

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

# Návrh ohříváku vzduchu pro parní plynový kotel

Design of the Air Heater for the Steam Gas Boiler

Autor práce:

Bc. Martin Chmiel

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Chmiel**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Návrh ohřívačku vzduchu pro parní plynový kotel**  
**Design of the Air Heater for the Steam Gas Boiler**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh zařízení pro ohřev spalovacího vzduchu pro plynový kotel.

### Zásady pro vypracování:

Proveďte návrh zařízení pro ohřev spalovacího vzduchu pro plynový kotel o výkonu 80 t páry.

Diplomová práce bude obsahovat:

1. Zhodnocení možností způsobu ohřevu vzduchu pro plynové kotle obdobného výkonu.
2. Vypočtete hmotovou bilanci spalín a vzduchu pro vybraná plynná paliva.
3. Proveďte měření vzduchového traktu kotle s cílem získání podkladů pro návrh ohřívačku vzduchu.
4. Vypracujte konstrukční návrh ohřívačku vzduchu.
5. Proveďte stručné ekonomické zhodnocení přínosu navrhovaného řešení.
6. Rozsah grafických prací: min 16 formátů A4.

### Seznam doporučené odborné literatury:

JANEBA, J., KARTÁK, K. Výpočty kotlů a parogenerátorů. 1.vyd. Praha: ČVUT. 1985. 83 s.  
RAJNIAK, I. a kol.: Tepelno-energetické a emisné merania, Ister Science, Bratislava 97. ISBN 80-88683-20-3.

Archiv zpráv katedry energetiky.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.  
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2019

  
.....

podpis studenta

**Prohlašuji, že:**

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského práva
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2019



.....  
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Chmiel

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ropice 329, 739 61 Ropice



## **Poděkování**

*Chtěl bych touto cestou velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Dr. Ing. Bohumíru Čechovi za cenné rady, konzultace a připomínky spojené s vypracováním mého úkolu.*

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Chmiel, M. *Návrh ohříváku vzduchu pro parní plynový kotel: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2019, 63 s. Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Diplomová práce je zaměřena na návrh parního ohříváku vzduchu plynového kotle, který spaluje různá plynná paliva a směsi plyných paliv. V ohříváku vzduchu dochází ke kondenzaci páry, která předává teplo nasávanému vzduchu. První částí práce je pojednání o různých typech ohříváku vzduchu a vypracování dvou technických zpráv z provedených měření za účelem získání podkladů pro návrh parního ohříváku vzduchu. Ve výpočtové části práce je řešena stechiometrie plyných paliv, účinnost kotle, bilanční výpočty a tepelný výpočet parního ohříváku vzduchu. Byl vypracován konstrukční návrh parního ohříváku vzduchu pro daný plynový kotel. V závěru práce je stručné ekonomické zhodnocení přínosu navrhovaného řešení.

## **ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS**

Chmiel, M. *Design of the Air heater for the Steam Gas Boiler: diploma thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2019, 63 p. Thesis head: doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

The thesis is focused on the design of a steam air heater of a gas boiler, which burns various mixtures of gaseous fuels. In the air heater, condensation of steam occurs, which transfers heat to the intake air. The first part of the thesis deals with different types of air heater and elaboration of two technical reports from performed measurements in order to obtain data for design of steam air heater. In the computational part of the thesis, the stoichiometry of gaseous fuels, boiler efficiency, balance calculations and heat calculation of the steam air heater are solved. In conclusion, there is a brief economic evaluation of the benefits of the proposed solution. The aim is to design a steam air heater for a given gas boiler.

## Obsah

Seznam použitých zkratk	9
Úvod	13
1 Ohříváky vzduchu	14
1.1 Rekuperační ohříváky vzduchu	14
1.1.1 Trubkové ohříváky vzduchu	15
1.1.2 Deskové ohříváky vzduchu	17
1.2 Regenerační ohříváky vzduchu	18
2 Základní popis a parametry plynového kotle	19
2.1 Technická data kotle K1	19
3 Měření rosného bodu spalin	22
3.1 Popis měření rosného bodu	22
3.2 Místo měření	23
3.3 Provozní režimy kotle v průběhu měření rosného bodu	24
3.4 Výsledky měření	24
3.5 Závěr z měření rosného bodu spalin	25
4 Měření vzduchového traktu kotle K1	27
4.1 Měření průtoku vzduchu v sání vzduchového ventilátoru	27
4.2 Měření tlaku vzduchu ve vzduchovém traktu kotle	28
4.2.1 Statické tlaky vzduchu byly měřeny v následujících místech vzduchového traktu kotle	29
4.3 Nastavení vzduchového režimu kotle K1 při měření „za tepla“	30
4.4 Provozní režimy v průběhu měření „za tepla“	31
4.5 Průběh měření „za tepla“	31
4.6 Průběh měření „za studena“	33
4.7 Výsledky měření „za tepla“	34
4.8 Výsledky měření „za studena“	34
4.9 Závěr měření	34
5 Stechiometrie spalování	35
5.1 Zemní plyn	35

5.2	Vysokopeční plyn .....	38
5.3	Koksárenský plyn .....	41
6	Výpočet kotle .....	44
6.1	Výpočet měrné tepelné kapacity vlhkých spalin .....	44
6.2	Tepelné ztráty kotle a účinnost.....	44
6.3	Výrobní teplo páry .....	45
6.4	Výpočet množství paliva.....	46
7	Tepelná bilance předeřevu a potřebné množství páry .....	46
7.1	Tepelná bilance předeřevu .....	47
7.2	Potřebné množství páry .....	47
8	Tepelný výpočet parního ohříváku vzduchu .....	48
8.1	Návrh trubek parního ohříváku vzduchu .....	48
8.1.1	Návrh roztečí svazku trubek .....	48
8.2	Výpočet rychlosti proudění vzduchu mezi trubkami .....	49
8.3	Výpočet součinitele přestupu tepla na straně vzduchu .....	49
8.4	Výpočet součinitele přestupu tepla na straně páry .....	51
8.4.1	Výpočet kondenzační části ohříváku .....	51
8.5	Výpočet součinitele prostupu tepla .....	52
8.6	Plocha ohříváku vzduchu .....	52
8.7	Tlaková ztráta trubkového svazku .....	54
9	Aerodynamický výpočet vzduchového traktu kotle .....	55
9.1	Průběh statického tlaku vzduchu se zařazením POV .....	55
9.2	Charakteristika ventilátoru .....	55
10	Jednoduché ekonomické zhodnocení .....	57
11	Závěr.....	58
12	Použitá literatura .....	59
13	Seznam obrázků .....	61
14	Seznam tabulek .....	62
15	Seznam příloh.....	63

## Seznam použitých zkratk

Značka	Jednotka	Popis
ZP		Zemní
VP		Vysokopecní plyn
KP		Koksárenský plyn
POV		Parní ohřívák vzduchu
$V_{O_2,t}$	$\frac{m_{N,O_2}^3}{m_{N,pal}^3}$	Teoretické vztažné množství kyslíku pro spalování
$V_{vz,t}^s$	$\frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$	Teoretické vztažné množství vzduchu suchého
$n$	[1]	Přebytek vzduchu
$\nu$	[1]	Součinitel vlhkosti
$V_{vz,s}^s$	$\frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství skutečného vzduchu suchého
$V_{vz,t}^v$	$\frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství teoretického vzduchu vlhkého
$V_{vz,s}^v$	$\frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství skutečného vzduchu vlhkého
$V_{CO_2,t}$	$\frac{m_{N,CO_2}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství CO <sub>2</sub> ve spalínách teoretických suchých
$V_{N_2,t}$	$\frac{m_{N,N_2}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství N <sub>2</sub> ve spalínách teoretických suchých
$V_{sp,t}^s$	$\frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství spalín teoretických suchých
$V_{H_2O,t}$	$\frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství H <sub>2</sub> O ve spalínách teoretických vlhkých
$x_{CO_2,t}$	%	Koncentrace CO <sub>2</sub> ve spalínách teoretických vlhkých
$x_{N_2,t}$	%	Koncentrace N <sub>2</sub> ve spalínách teoretických vlhkých
$x_{H_2O,t}$	%	Koncentrace H <sub>2</sub> O ve spalínách teoretických vlhkých
$V_{H_2O,s}$	$\frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství H <sub>2</sub> O ve spalínách skutečných vlhkých
$V_{sp,s}^v$	$\frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství spalín skutečných vlhkých
$V_{CO_2,s}$	$\frac{m_{N,CO_2}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství CO <sub>2</sub> ve spalínách skutečných vlhkých
$V_{N_2,s}$	$\frac{m_{N,N_2}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství N <sub>2</sub> ve spalínách skutečných vlhkých
$V_{O_2,s}$	$\frac{m_{N,O_2}^3}{m_{N,pal}^3}$	Vztažné množství O <sub>2</sub> ve spalínách skutečných vlhkých
$x_{CO_2,s}$	%	Koncentrace CO <sub>2</sub> ve spalínách skutečných vlhkých

$x_{N_2,s}$	%	Koncentrace $N_2$ ve spalínách skutečných vlhkých
$x_{H_2O,s}$	%	Koncentrace $H_2O$ ve spalínách skutečných vlhkých
$x_{O_2,s}$	%	Koncentrace $O_2$ ve spalínách skutečných vlhkých
$c_p$	$kJ \cdot m_n^{-3} \cdot K^{-1}$	Měrná tepelná kapacita
$\rho$	$kg \cdot m^{-3}$	Hustota
$\dot{m}_{CO}$	$mg \cdot m_R^{-3}$	Naměřené množství CO ve spalínách
$Z_{co}$	[1]	Ztráta chemickým nedopalem
$Z_K$	[1]	Komínová ztráta
$Z_{svj}$	[1]	Ztráta sdílením tepla do okolí
$\eta_k$	[1]	Účinnost kotle
$Q_{Výr}$	$kW$	Výrobní teplo páry
$t_{pp}$	$^{\circ}C$	Teplota přehřáté páry
$p_{pp}$	$MPa$	Tlak přehřáté páry
$i_{pp}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie přehřáté páry
$t_{sp1}$	$^{\circ}C$	Teplota středotlaké páry na vstupu
$p_{sp1}$	$MPa$	Tlak středotlaké páry na vstupu
$i_{sp1}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie středotlaké páry na vstupu
$t_{sp2}$	$^{\circ}C$	Teplota středotlaké páry na výstupu
$p_{sp2}$	$MPa$	Tlak středotlaké páry na výstupu
$i_{sp2}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie středotlaké páry na výstupu
$t_{sk}$	$^{\circ}C$	Teplota syté kapaliny
$p_{sk}$	$MPa$	Tlak syté kapaliny
$i_{sk}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie syté kapaliny
$t_{nv}$	$^{\circ}C$	Teplota napájecí vody
$p_{nv}$	$MPa$	Tlak napájecí vody
$i_{nv}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie napájecí vody
$M_{pal}$	$m^3 \cdot s^{-1}$	Množství paliva
$Q_P$	$kW$	Teplo páry
$Q_{VZ}$	$kW$	Teplo vzduchu
$Q_{POV}$	$kW$	Teplo parního ohříváku vzduchu
$\beta_{OVZ}$	[1]	Součinitel netěsnosti ohříváku vzduchu
$t_{vz1}$	$^{\circ}C$	Teplota vzduchu na vstupu
$t_{vz2}$	$^{\circ}C$	Teplota vzduchu na výstupu
$\eta$	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$	Dynamická viskozita
$\nu_k$	$m^2 \cdot s^{-1}$	Kinetická viskozita

$\lambda$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Tepelná vodivost
$Pr$	[1]	Prantlovo číslo
$i$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie
$i'$	$kJ \cdot kg^{-1}$	Kondenzační teplo
$\dot{m}_p$	$kg \cdot s^{-1}$	Množství páry
$D$	$m$	Vnější průměr
$d_a$	$m$	Charakteristický průměr trubky
$t_{tr}$	$m$	Tloušťka stěny trubky
$d_1$	$m$	Vnitřní průměr trubky
$d_2$	$m$	Vnější průměr trubky
$h$	$m$	Délka žebra
$t_{tr}$	$m$	Tloušťka žebra
$u$	$m$	Rozteč mezi žebry
$s_0$	$m$	Příčná rozteč svazku
$s_1, s_2$	$m$	Podélná rozteč svazku trubek
$c_e$	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost proudění vzduchu mezi trubkami
$c_0$	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost vzduchu na vstupu
$a, b$	[1]	Charakteristický koeficient podélné rozteče
$Re$	[1]	Reynoldsovo číslo
$Nu$	[1]	Nusseltovo číslo
$f_4, f_n$	[1]	Korekční součinitel
$\alpha_a$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla na straně vzduchu
$\alpha_{kond}$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla na straně kondenzace páry
$k$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel prostupu tepla
$\varphi$	$m$	Ekvivalentní výška žebra
$X$	$m^{-1}$	Výpočetní velikost žebra
$\eta_z$	[1]	Účinnost žebra
$S'_{POV}$	$m^2$	Potřebná plocha ohříváku vzduchu
$S_{tr}$	$m^2$	Plocha 1 metru žebrované trubky
$n'_{tr}$	$ks$	Počet potřebných žebrovaných trubek
$n_{tr}$	$ks$	Skutečný počet žebrovaných trubek
$S_{POV}$	$m^2$	Skutečná plocha ohříváku vzduchu
$\Delta p$	$Pa$	Tlaková ztráta prouděním
$\Delta p_m$	$Pa$	Tlaková ztráta místní
$\zeta$	[1]	Součinitel tlakové ztráty



$K, k_1, k_2, k_3$	[1]	Konstanty v závislosti na uspořádání trubek
$\Delta p_c$	Pa	Celková tlaková ztráta

## Úvod

V dnešní době se každé průmyslové odvětví snaží o co nejefektivnější a neekonomičtější provoz svých zařízení. S rozvojem populace a průmyslu jsou kladeny stále vyšší nároky na množství tepelné a elektrické energie. Pro výrobu elektřiny, tepla nebo jejich kombinaci jsou hlavními vstupy do kotle palivo, spalovací vzduch a napájecí voda. Proces hoření ve spalovací komoře můžeme jednoduše popsat jako transformaci chemické energie vázané v palivu, za přístupu oxidačního činidla (spalovacího vzduchu), na zvýšení entalpie teplotního média. V minulosti patřily spalovací procesy k těm, které nejvíce znečišťovaly životní prostředí, proto vzniká mnoho nařízení a norem, které musí dané zařízení splňovat a snaží se spalovací proces neustále zlepšovat. Důraz je kladen především na dílčí části spalovacího zařízení, díky kterému se zlepší celá efektivita spalovacího procesu.

Jednou z nejvýznamnějších dílčích částí spalovacího procesu je využití zařízení pro předehřev spalovacího vzduchu. Ohříváky vzduchu mohou být použity samostatně nebo jsou součástí rekuperačního systému. Ke zvýšení efektivity celého systému přispívají snížením komínových ztrát, zlepšením průběhu vznícování paliva a jeho hořením, zvýšením spalovací teploty v ohništi a celé teplotní úrovně ve spalovací komoře při současné úspoře paliva.

Předehříváním studeného nasávaného vzduchu vhodným médiem (parou) zvýšíme teplotu spalin za kotlem, která má velký vliv na intenzitu nízkoteplotní koroze zařízení řazených na konci kotle. Teplota spalin za kotlem má velký vliv na intenzitu nízkoteplotní koroze, aby se jí předešlo, je třeba udržovat teplotu spalin nad teplotou rosného bodu a zároveň se musí dodržet teplota stěny studeného konce (poslední teplosměnné plochy) nad teplotou rosného bodu spalin. Vysoká teplota spalin nám sice zaručí ochranu zařízení před korozí, ale sníží nám účinnost kotle, tudíž vychlazením spalin na co nejnižší teplotu získáme vyšší účinnost kotle, ale koroze zařízení bude intenzivnější. Udržování teploty spalin za kotlem nad rosným bodem nám zajistí ochranu před korozí na konci kotle při maximálně možné dosažitelné účinnosti. Toto má na starost řídicí systém. Regulaci těchto dvou parametrů lze nejspolehlivěji zajistit změnou teploty vzduchu vstupujícího do ohříváku vzduchu. Docílíme toho pomocí výše zmíněného předehřátí studeného vzduchu, které může být provedeno v parním ohříváku vzduchu nebo recirkulací části horkého vzduchu. V diplomové práci se zabývám návrhem parního ohříváku vzduchu u kotle na plynná paliva. Zařazením tohoto parního ohříváku vzduchu se omezí nebo vyloučí nebezpečí vzniku nízkoteplotní koroze na konci kotle.

# 1 Ohříváky vzduchu

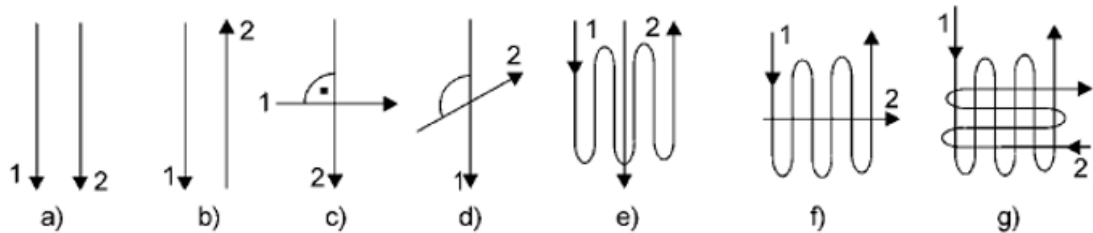
Jsou to energetická zařízení, která zajišťují výměnu tepla mezi médii o různé teplotě. Ohříváky vzduchu dělíme podle způsobu přenosu tepla na rekuperační a regenerační. Ohřívák vzduchu se většinou používá u kotlů, kde je potřeba snížit teplotu za kotlem a tím snížit komínovou ztrátu. Nejčastějším zdrojem tepelné energie jsou spaliny. Se zvyšujícím se výkonem kotle se zvyšovala i teplota spalin, abychom docílili i zvýšení účinnosti kotle, musíme snížit teplotu spalin. Proto se začaly používat ohříváky vzduchu. Celková účinnost kotle může být takto zvýšena o 5 až 10 %. Ohřátý vzduch se může použít při spalování, kde horký vzduch přispívá ke vznícení a zlepšení vyhořívání paliva, také se může použít k sušení paliva ve mlýnech. Platí, že čím méně je v daném palivu prchavé hořlaviny, tím vyšší by měla být teplota spalovacího vzduchu. Zvýší se tak teplota plamene a přestup sáláním v ohništi. Při spalování plyných a kapalných paliv jsou ohřívána i samotná paliva.

U některých kotlů v energetickém průmyslu je k předehřevu spalovacího vzduchu použita pára (parní ohříváče vzduchu). V parním ohříváku vzduchu se předehřev uskutečňuje pomocí páry z posledního odběru turbíny nebo parou vyrobenou ve spalínové odparce, či z jiných zdrojů v závislosti na konkrétním řešení. Pro ochranu proti nízkoteplotní korozi se nasávaný vzduch předehřívá na teploty 40 až 80 °C podle konkrétní aplikace. Vyšší předehřev vzduchu zmenšuje teplotní spát a vedl by k snížení tepelného výkonu ohříváku a následně k růstu teploty spalin za kotlem což zhoršuje jeho celkovou účinnost. Tento efekt se projeví zejména u parního předehřevu, jelikož v případě recirkulace spalin je toto částečně kompenzováno zvýšením rychlosti vzduchu a zlepšenou konvekcí, avšak předehřev vzduchu odběrovou parou zvyšuje termickou účinnost kondenzačního bloku. [1], [2]

## 1.1 Rekuperační ohříváky vzduchu

V těchto tepelných výměnících je teplo nepřetržitě přenášeno přímo přes pevnou stacionární teplosměnnou plochu, která od sebe trvale odděluje obě média. Rekuperační výměníky neobsahují pohyblivé části, proto jsou považovány za těsné.

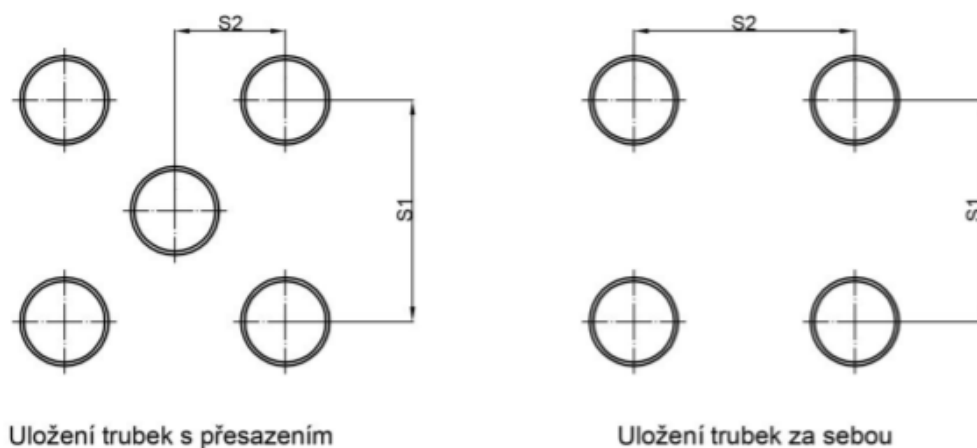
Mají však vyšší nároky na prostor. Můžeme je rozdělit podle směru toků medií: a) souproud, b) protiproud, c), d) křížený, e), f), g) vícenásobně křížený viz Obrázek 1-1.



Obrázek 1-1 Rozdělení podle směru proudů [5]

### 1.1.1 Trubkové ohříváky vzduchu

U trubkových ohříváčů vzduchu je nejčastější zapojení takové, kdy je energie předávána z teplého proudu, proudícího v trubkovém prostoru tenkostěnných trubek do chladného spalovacího vzduchu proudícího mezitrubkovým prostorem. Ohřívák je tvořen ze svazku rovných trubek, které jsou přivařené nebo zaválcované k trubkovnicím, ty mají obvykle tloušťku 15 až 25 mm. Takto vytvořený trubkový svazek je uzavřen v ocelovém plášti. Svazek svisle uspořádaných trubek je připevněn buďto k horní nebo spodní pevné trubkovnici, kdežto druhá trubkovnice se může volně pohybovat vzhledem k závislosti na dilataci trubek. Dilatační spáry, které jsou mezi plovoucí trubkovnicí a pláštěm, se většinou opatřují těsněním. Přechodové usměrňovací přepážky se často využívají k rozdělení nebo usměrnění průtokové cesty. Jednou z jejich předností je eliminace případného poškození trubek vlivem vibrací vzniklých prouděním média. Pro výrobu výměníku se používají uhlíkové oceli, či korozi-vzdorný materiál. Je možné zvolit ze dvou uspořádání svazku trubek, a to uspořádání za sebou nebo s přesazením (Obrázek 1-2), které umožňuje intenzivnější přenos tepla. [2] [4]



Uložení trubek s přesazením

Uložení trubek za sebou

Obrázek 1-2 Uspořádání svazku

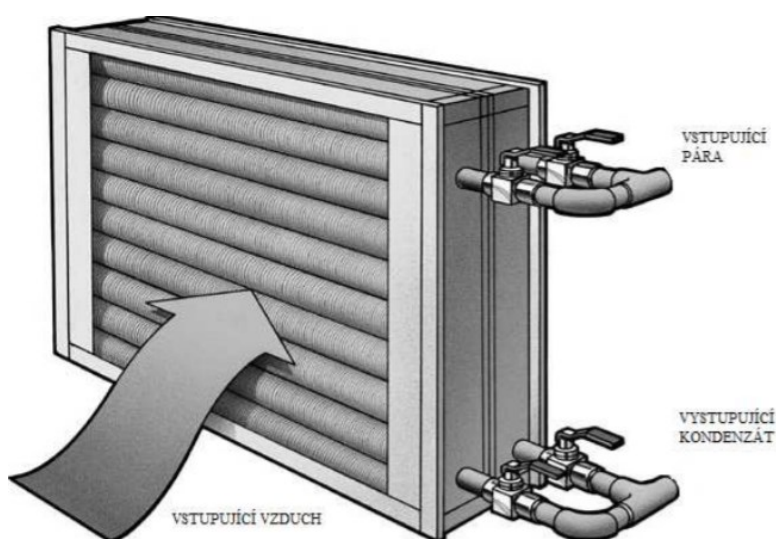
Průměr trubek se nejčastěji volí v rozsahu 25 až 40 mm, s tloušťkou stěny trubky 1,25 až 2,0 mm. Při menším průměru trubky je dosaženo lepšího přestupu tepla a pokud zachováme rychlosti proudících médií a stejnou teplotu ohřátého vzduchu, vyjde nám menší výška ohříváku, ovšem u užších trubek je větší riziko jejich ucpání. Čištění trubkového ohříváče vzduchu od nejrůznějších usazenin a nečistot je prováděno parním nebo vzduchovým ofukem. Nejběžnějším zapojením pracovních látek je protiproudý tok v jedno nebo vícechodém provedení, což závisí na konkrétním zařízení. Projekty těchto zařízení jsou zhotoveny tak, aby splňovaly konkrétní projekční předpisy daného zařízení, jako je obtok studeného vzduchu nebo recirkulace horkých spalin, aby se zamezilo zanášení popelem a k podkročení rosného bodu spalin, které vede ke korozi na takzvaném studeném konci předeřhřevu. Moderní ohříváky spalovacího vzduchu jsou sestavovány v blocích do velkých přenosných modulů. [1] [2] [3] [4]

#### Trubkový ohřívák skleněný

Trubky u tohoto typu výměníku jsou vyráběny z borokřemičitého skla. Jejich výhodou je odolnost vůči korozi a díky větší hladkosti nižší tlaková ztráta oproti ocelovým trubkám. Tento typ ohříváku je možné požit maximálně do teploty stěny 350 °C. Nevýhodou skleněných trubek je nižší součinitel prostupu tepla, než u trubek železných a díky rozdílné tepelné roztažnosti železa a skla je nezbytné kluzné spojení trubek s trubkovnicemi uchytit pomocí manžet ze speciálních těsnících kyselinovzdorných tkanin, proto je těsnost skleněných ohříváků nižší než u ocelových. [2]

#### Parní ohřívák vzduchu

Parní a vodní ohříváky vzduchu jsou také používány jako rekuperační ohříváče vzduchu, zejména v parních elektrárnách pro předeřhřev spalovacího vzduchu. Obvykle jsou součástí předeřhřivací soustavy. Jejich použitím se eliminuje vznik koroze na studeném konci hlavního předeřhřiváče spalovacího



**Obrázek 1-3 Princip parního ohříváku vzduchu [7]**

vzduchu. Můžou také být jediným zdrojem pro předeřhřev spalovacího vzduchu. Parní

a vodní ohříváky vzduchu se skládají z přívodního potrubí o malém průměru a žebrovaných trubek uspořádaných vodorovně nebo svisle, umísťují se do kanálu mezi ventilátor spalovacího vzduchu a hlavní ohřivač vzduchu. Pára, která je odebrána z turbíny proudí žebrovanými trubkami, mezi kterými protéká křížovým tokem spalovací vzduch. Místo páry je možné použít napájecí vodu nebo etylenglykol, který zamezuje poškození, které by mohlo nastat působením mrazu. [6]

#### Litínové ohříváky vzduchu

Litínové ohříváky jsou velice těžké a velké, ale také odolné. Tyto ohříváky se už téměř nepoužívají, v minulosti byly využívány v těžkých průmyslových podmínkách z důvodu vysoké odolnosti proti korozi. Jsou montovány z litinových trub, které mají zvětšenou vnější i vnitřní výhřevnou plochu odlitými žebry a jehlami. Kanály vzduchu a spalin měly odlity čtyřúhelníkové příruby vytvořeny z válcovaných profilů, ty se poskládaly na sebe do rámu, spoje se utěsnily těsníci provazci. Nejčastěji používané délky byly 1 500 až 3500 mm, vyrobeny z šedé litiny nebo z ohnivzdorné litiny pro vyšší teploty spalin. Tloušťka stěny závisí na způsobu odlévání, pohybuje se od 6 do 8 mm. Trubky se sestavovaly do paralelních sekcí převáděcími kanály, přičemž musela být zajištěna správná rychlost spalin. U litinových ohříváku vzduchu spaliny proudí v jednocestném uspořádání v mezitrubkovém prostoru a ohříváný vzduch proudí uvnitř trubek, kde je uspořádání vícechodé. [2] [8]

#### **1.1.2 Deskové ohříváky vzduchu**

Deskové ohříváky vzduchu předávají teplo ze spalin proudících na jedné straně desky, studenému spalovacímu vzduchu proudícím na straně druhé. Tento typ ohříváku je obvykle zapojen jako protiproud nebo křížový tok. Je složen z několika



**Obrázek 1-4 Deskový výměník s protiproudem [9]**

rovnoběžně uspořádaných desek, jejich těsnost je zabezpečena svařením nebo kombinací těsnění a pružin stlačených z venku přítlačnou deskou. Materiál desek a vzdálenost desek mezi sebou se určují samostatně pro konkrétní případy v závislosti na provozních požadavcích a druhu spalovaného paliva. První se používaly ocelové desky, od těch se jednu dobu upustilo kvůli problémům s utěsněním, ovšem díky vývoji těsnících materiálů se ocelové desky opět používají u průmyslových a malých užitkových zařízení. Moderní deskové výměníky mají tu výhodu, že jsou menších rozměrů než trubkové výměníky o stejné kapacitě a disponují minimálními úniky spalin a spalovacího vzduchu. [3] [4]

## 1.2 Regenerační ohříváky vzduchu

Regenerační tepelný výměník přenáší teplo nepřímo pomocí konvekce a vedení tepla. Absorbér je opakovaně vystaven průtokům teplých a studených proudů médií. Toto střídání teplých a studených proudů je provedeno rotačně nebo spínači, které jsou ovládány ventily. Pro přenos tepelné energie mezi médii jsou voleny různé materiály. V parních energetických zařízeních jsou nejčastěji používány svazky zvlněných ocelových plechů. U tohoto provedení se otáčí ocelové plechy nebo plošné elementy přes proud spalin a spalovacího vzduchu. Také se může otáčet přímé potrubí, ve kterém proudí spaliny a spalovací vzduch přes pevné plošné elementy. Regenerační ohříváky vzduchu jsou celkem kompaktní a řadí se mezi nejrozšířenější typy zařízení pro ohřev spalovacího vzduchu v parních energetických zařízeních. Mezi nejčastěji používané regenerační ohříváče vzduchu patří ohřívák vzduchu typu Ljungström a Rothemühle. [2] [3] [4]



Obrázek 1-5 Typ Ljungström [10]



## 2 Základní popis a parametry plynového kotle

Parní kotel K1 je jednobubnový s přirozenou cirkulací, vodotrubný, samonosný, podtlakový. Je určen pro spalování směsí plynů ve čtyřech plynových hořácích, které jsou umístěny na přední stěně kotle. Kotel je vybavený jedním radiálním vzduchovým ventilátorem a jedním spalínovým ventilátorem.

Pro účely dodržení požadované teploty přehřáté a přihřáté páry při snížených výkonech slouží recirkulace spalin.

Kotel je tří tahový. První tah tvoří spalovací komora skládající se z membránových stěn. Po směru proudění spalin jsou v druhém tahu umístěny vodorovné hady přehříváče páry a dva svazky ohříváku vody. Požadovaná teplota přehřáté páry je regulovaná vstřikem napájecí vody za přehřívák a za přihřívák páry. V třetím tahu, tvořeném plechovým kanálem, jsou umístěny dva svazky ohříváče vody a trubkový ohříváč vzduchu. Ohřívák vody a vzduchu je určen pro účely dosažení vyšší účinnosti kotle.

Ohříváč vzduchu má nainstalované obtokové kanály za účelem regulace výstupní teploty spalin za kotlem. Tlakový celek je vybaven trvalým dluhem pro dodržení kvality výstupní páry.

### 2.1 Technická data kotle K1

Jmenovitý výkon vysokotlaké páry:	80	t. h <sup>-1</sup>
Minimální výkon vysokotlaké páry:	28	t. h <sup>-1</sup>
Tlak přehřáté páry na výstupu z kotle:	12	MPa
Teplota páry na výstupu z kotle:	495	°C
Teplota napájecí vody:	115,	
Výkon přihřáté páry:	max. 110	t. h <sup>-1</sup>

Uvedený průtok je maximální, minimální průtok je ekvivalentní min. regulačnímu výkonu vysokotlaké páry kotle.

Tlak přihřáté páry z kotle:	1,8 – 2,2	MPa
Teplota přihřáté páry:	380	°C
Teplota spalin za kotlem (před komínem):		

- min. 125.1 °C (chudý plyn)
- min. 113,4 °C (průměrný plyn)
- min. 118,4 °C (bohatý plyn)

Maximální množství spalovaných plynů samostatně, anebo ve směsi plynů:

- vysokopecní plyn 80 000 Nm<sup>3</sup>. hod<sup>-1</sup>
- koksárenský plyn 12 500 Nm<sup>3</sup>. hod<sup>-1</sup>
- konvertorový plyn 15 000 Nm<sup>3</sup>. hod<sup>-1</sup>
- zemní plyn 5 000 Nm<sup>3</sup>. hod<sup>-1</sup>

### Ventilátor

Ventilátor je radiální, vysokotlaký, jednostranně sací s osovou regulací.

### Technické údaje

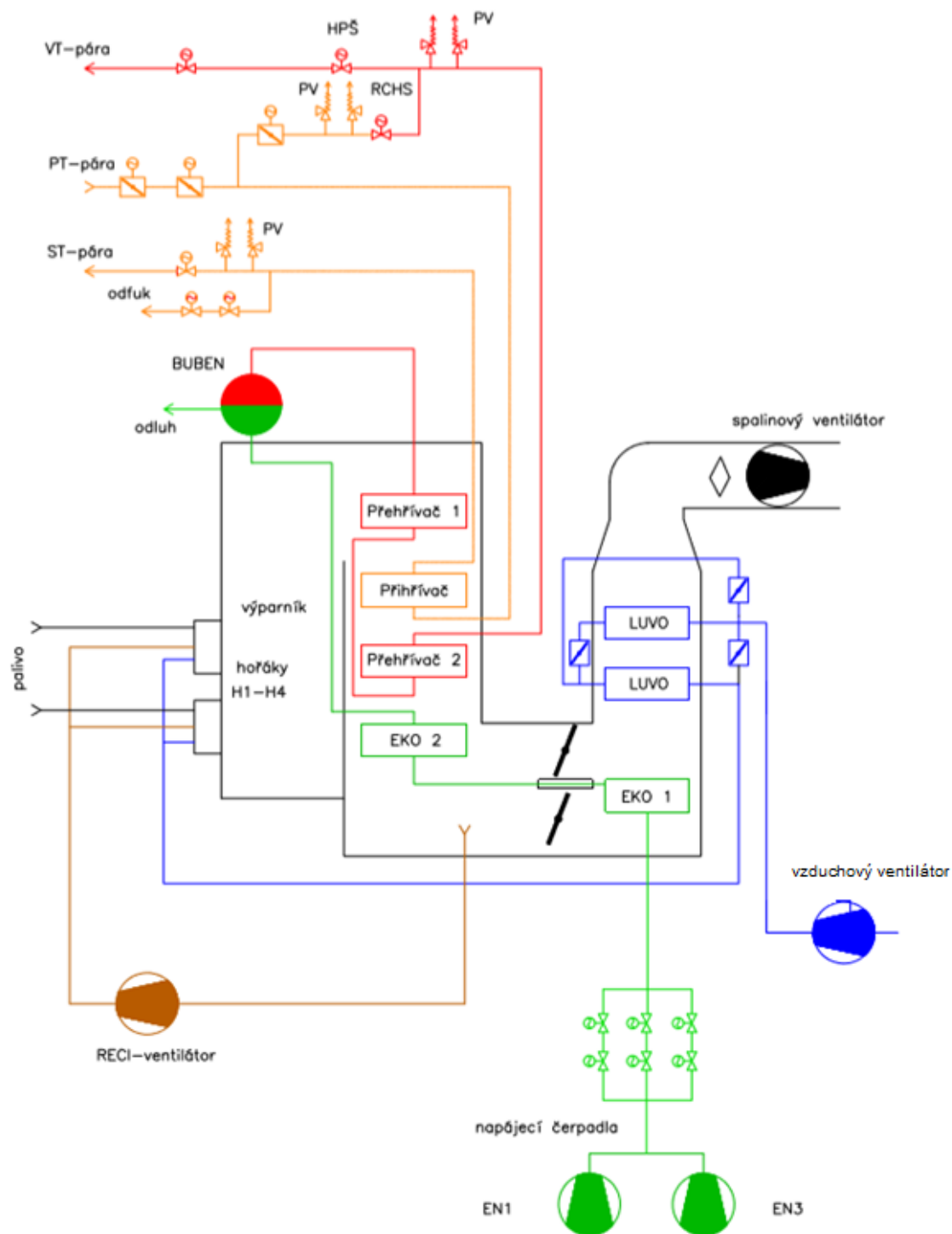
Typ ventilátoru: RVM 1600/1 – 6N – L180° - 135 °

Parametry:

- $Q_V$ : 26,51 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>
- $\Delta p_V$ : 10 260 Pa
- $q_V$  1,202 kg.m<sup>3</sup>

Elektromotor:

- $P_E$ : 365 kW
- $n_E$ : 1481 ot.min<sup>-1</sup>
- $U_E$ : 6000 V



Obrázek 2-1 Stávající schéma kotle

### 3 Měření rosného bodu spalin

#### 3.1 Popis měření rosného bodu

Měření rosného bodu bylo provedeno sondou Landcom 200 (viz. Obrázek 3-1). Těleso sondy je z nerezové oceli a má délku 1,5 metrů. Sonda má v přední části umístěné vlastní měřící čidlo. Do proudu spalin ve spalinovém kanálu se umísťuje činná měřící část sondy.

Principem měření je postupné řízené ochlazování měrného čidla (viz. Obrázek 3-2), které se skládá z platinových elektrod zatavených v pyrex skle. Platinové elektrody a sklo jsou ochlazovány tlakovým vzduchem přivedeným z rozvodu technologického tlakového vzduchu. Začátek měření začíná zavedením sondy do kouřovodu a temperováním čidla na teplotu blízkou teplotě spalin. Během měření je současně měřena teplota čidla a teplota spalin. Teplota čidla se pak řízeně snižuje, čímž se v určitém okamžiku dosáhne teploty rosného bodu, nastane kondenzace par ze spalin a zvlhnutí povrchu čidla. Povrch čidla na straně spalin se díky kondenzaci složek spalin stává elektricky vodivým. Detekce procesu kondenzace je indikována snímačem proudu, zobrazení je viditelné na vyhodnocovací jednotce (viz. Obrázek 3-3), kdy nárůst hodnoty proudu [ $\mu\text{A}$ ] mezi elektrodami znamená začátek procesu kondenzace a dosažení teploty rosného bodu. Během měření je třeba brát ohled na možný vliv tuhých částic, které se mohou usazovat na ploše čidla a můžou tak značně ovlivňovat možnost realizace měření. Po dosažení teploty rosného bodu je omezeno chlazení čidla, čímž se dosáhne opětovného zvyšování teploty na čidle a odpaření kondenzovaných složek. Následně je sonda vyjmuta z kanálu spalin a čidlo je očištěno od případných nánosů kondenzovaných složek.



Obrázek 3-1 Sonda Landcom 200



**Obrázek 3-3 Čidlo – detektor  
rosného bodu sondy  
s platinovými elektrodami**



**Obrázek 3-2 Zobrazovací jednotka  
sondy Landcom 200**

### 3.2 Místo měření

Měření rosného bodu a složení spalín bylo provedeno na výstupu spalín z kotle před spalínovým ventilátorem kotle K1, v rovině určené pro kalibraci prachoměru za uvedeným kotlem. Složení spalín bylo měřeno kontinuálně provozními měřicími přístroji. Pro měření byly využity měřicí otvory s přírubou o průměru Ø 200 mm na pravé straně kotle v přední části spalínového kanálu ve vzdálenosti cca 1,2 metrů od vnitřní stěny spalínového kanálu. V daném časovém období probíhal proces vyrovnání teplot čidla sondy na teplotu spalín, následovala fáze snižování teploty čidla a dosažení vlastní teploty rosného bodu. V okamžiku dosažení rosného bodu na čidle sondy byl proveden zápis hodnot. Tento postup se vždy opakoval.

### 3.3 Provozní režimy kotle v průběhu měření rosného bodu

Číslování jednotlivých zkoušek	Plánovaná korekce O <sub>2</sub>	Plánované množství VP [tis. m <sup>-3</sup> . h <sup>-1</sup> ]	Plánované množství KP [tis. m <sup>-3</sup> . h <sup>-1</sup> ]	Plánované množství ZP [tis. m <sup>-3</sup> . h <sup>-1</sup> ]	Skutečné množství vyrobené páry [t. h <sup>-1</sup> ]
Zkouška č. 1		-	9	1	71,9
Zkouška č. 2.a	-1,5	-	4	2	45,6
Zkouška č. 2.b	0,5	-	4	2	49,1
Zkouška č. 3		15	9	0,5	66,7
Zkouška č. 4		30	9	-	60,2
Zkouška č. 5.a	-0,3	30	4	-	53,2
Zkouška č. 5.b	0,5	30	4	-	45,2
Zkouška č. 6		50	4		44,6

Tabulka 1 Označení zkoušek na kotli

### 3.4 Výsledky měření

		Zkouška č.4	Zkouška č.5a	Zkouška č.5b	Zkouška č.6
Teplota spalin v místě měření	[°C]	95	92	91	111
Rosný bod měřený sondou LAND	[°C]	46	37	41	<28
Výpočtový obsah vody ve spalinách, vzdušině	[%]	0,07327	0,04798	0,04753	0,03941
Teplota sytosti vodních par ve spalinách (výpočtová)	[°C]	47	39,64	39,47	36,24

Tabulka 2 Výsledky měření rosného bodu spalin 1/2

		Zkouška č.3	Zkouška č.1	Zkouška č.2a	Zkouška č.2b
Teplota spalin v místě měření	[°C]	84	74	66	66
Rosný bod měřený sondou LAND	[°C]	53,5	55	53	49,5
Výpočtový obsah vody ve spalinách, vzdušině	[%]	0,09288	0,1476	0,1383	0,1195
Teplota sytosti vodních par ve spalinách (výpočtová)	[°C]	51,25	59,4	58,27	55,71

**Tabulka 3 Výsledky měření rosného bodu spalin 2/2**

Všechny snímky obrazovek řídicího systému z jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v **Příloze A**.

### 3.5 Závěr z měření rosného bodu spalin

Rosný bod spalin byl měřen sondou LAND 200 in-situ čidlem detekujícím kondenzaci par složek spalin na povrchu čidla s řízenou teplotou povrchu čidla. V místě umístění čidla v kanále kouřovodu byla současně měřená teplota rosného bodu a teplota spalin.

Čidlo bylo naistalováno na pravé straně kotle v měřicím otvoru nacházejícím se blíže přední stěny spalinového kanálu, zasunutí čidla ve spalinovém kanálu byla cca 1,2 m. V místě měření byla vždy naměřena teplota spalin o cca 30 °C nižší než provozním měřením teploty spalin na výstupu z kotle. Toto je dáno uspořádáním přívodu studeného vzduchu do spalinového ohříváku vzduchu kotle K1. Vzduch vstupuje ve směru od přední stěny, a proto je u přední stěny II. tahu kotle vždy nižší teplota vzduchu než u stěny zadní. Provozní teploměr u kotle K1 ukazuje přibližnou střední hodnotu teploty spalin. Ze způsobu přivádění nasávaného studeného vzduchu do ohříváku vzduchu vychází, že ke kondenzaci vodní páry ve spalinách bude docházet od přední stěny II. tahu směrem dozadu.



Nejvýznamnější vliv na rosný bod má koncentrace vodní páry ve spalínách, takže spalované plyny bohatší na obsah vodíku a vody v surovém plynu mají výrazně vyšší teplotu, při které dochází ke kondenzaci vodní páry ve spalínách (rosný bod). V tomto případě se jedná zejména o koksárenský plyn a zemní plyn. Naopak vysokopecní a konvertorové plyny mají ve složení nižší obsah vodíku i vodní páry v surovém plynu, rosný bod je celkem nízký a ke kondenzaci dochází zřídka.

V kondenzátu vodní páry z vodíku a vodní páry ve spalínách se nenachází pouze vodní pára, ale nalezneme zde i zkondenzovatelné a rozpustné kyselé složky spalin a aerosoly. Tyto složky napomáhají korozi a zanášejí spalinové části ohříváku vzduchu. Kapalně složky kondenzátu vstřebávají i prachové částice, které se vyskytují v plynu a dále urychlují zanášení společně s korozí. Podkračování a překračování rosného bodu na kotli je střídavé, což zapříčiňuje tvrdé nánosy a koroze studených částí ohříváku vzduchu.

Průměrná teplota spalin v měřicím místě na výstupu spalin z kotle K1 se pohybovala v rozmezí od 66 do 111 °C. Tato teplota je závislá na výkonu kotle, teplotě nasávaného vzduchu, typu spalovaného plynného paliva a z části i na přebytku vzduchu. Měřený rosný bod ve spalínách se při měřicích zkouškách pohyboval od 28 do 55 °C, adekvátně k směsi spalovaných plynů a zejména k podílu vodíku a vodní páry obsažených v těchto plynech.

Porovnáním vypočtených hodnot rosného bodu vodních par ve spalínách a naměřených hodnot (viz Tabulka 2 a 3) lze říci, že naměřené hodnoty rosného bodu jsou hodnotami rosného bodu vodních par, nikoliv však kyselého rosného bodu. Z fyzické kontroly ohříváku vzduchu kotle K1 lze usoudit, že kyselý rosný bod se na ohříváku vzduchu v oblasti vyšších povrchových teplot neprojevuje. To je zapříčiněno nízkou koncentrací kyselých složek spalin (plynů a aerosolů). Kyselé složky ( $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ) ve spalínách významnou měrou urychlují korozi ohříváku vzduchu v oblasti rosného bodu vodní páry.

Kotel v současné době nasává spalovací vzduch z prostoru kotelný. Teplota takto nasávaného vzduchu je v letním období od 35 do 40 °C a v zimním období od 30 do 35 °C. V průběhu měření (prosinec) teplota nasávaného vzduchu za vzduchovým ventilátorem kolísala od 36 do 37 °C při venkovní teplotě vzduchu 2 °C. Když je změřený nebo vypočtený rosný bod 55 až 66 °C dochází v ohříváku vzduchu vždy ke kondenzaci v koncové části ohříváku vzduchu.

Zanášení a koroze ohříváku vzduchu je v současné době řešena nasáváním vzduchu vzduchovým ventilátorem výhradně z kotelny. Dochází tak k posunutí teploty vzduchu na vstupu do spalínového ohříváku vzduchu k lepšímu vzhledem k rosnému bodu. Takový to provozní stav je příznivý, ovšem je otázkou, zdali se v mrazivých dnech podaří nasávat vzduch pouze zevnitř a nedošlo k nežádoucímu podchlazení spodní části kotelny, kdy by mohlo dojít k zamrznutí některých neizolovaných potrubí.

Vhodné řešení by bylo instalace parního ohříváku vzduchu. Nasávat studený vzduch jako směs venkovního a vnitřního vzduchu a tento vzduch za ventilátorem ohřívat v parním kondenzačním ohříváku napojeném na nízkotlakou páru. Tímto se dá jednoznačně překlenout rosný bod spalín ve spalínovém ohříváku vzduchu na konci kotle. Teplotu ohřátého vzduchu by bylo možno regulovat a zachovat tak vysokou účinnost kotle. Jednou z dalších možných variant je přestavba kotle na kotel kondenzační, čímž se současně dosáhne výrazného zvýšení účinnosti kotle.

## **4 Měření vzduchového traktu kotle K1**

Měření bylo provedeno jako podklad pro úpravu vzduchového traktu kotle pro možnost instalace parního ohříváku vzduchu. Cílem měření bylo zjistit výkony stávajícího vzduchového ventilátoru a tlakové ztráty vzduchového traktu kotle pro ověření možnosti instalace parního ohříváku vzduchu do výtlaku vzduchového ventilátoru kotle K1. Měření bylo provedeno za provozu kotle tzv. „za tepla“ při čtyřech různých výkonech. V průběhu měření, za provozu kotle, nebylo možné regulovat průtok vzduchu přes vzduchový ventilátor klapkou na výtlaku vzduchu z ventilátoru, tím bylo znemožněno proměření charakteristiky ventilátoru, rovněž potřebné pro návrh ohříváku vzduchu. Toto měření mohlo být provedeno v době odstávky kotle po opravě ohříváku vzduchu LUVU.

Měření charakteristiky vzduchového ventilátoru kotle K1 bylo provedeno v době odstávky kotle. Tím byly získány komplexní podklady pro návrh parního ohříváku vzduchu pro kotel K1.

### **4.1 Měření průtoku vzduchu v sání vzduchového ventilátoru**

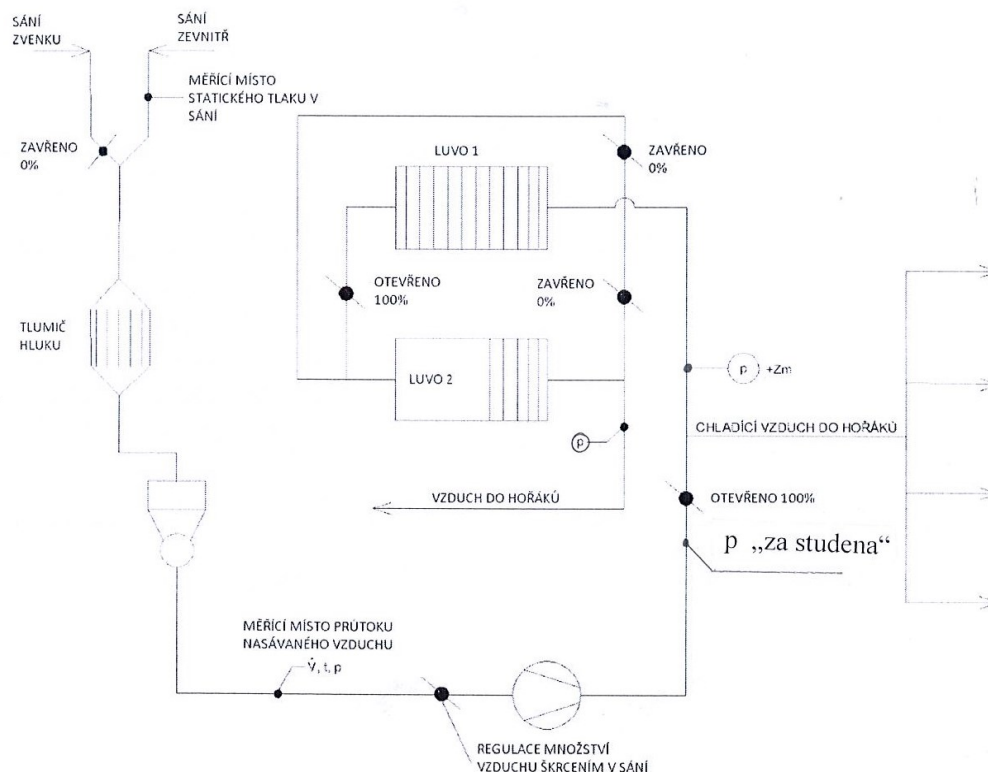
Měření množství průtoku vzduchu bylo provedeno podle schématu (viz Obrázek 2-1). Ve vzduchovém ventilátoru na straně sání ve výškové úrovni + 1,5 m byl v připravených měřicích otvorech kruhového potrubí o průměru 1260 mm měřen dynamický tlak, statický tlak a teplota nasávaného vzduchu.

Na vstupu do ventilátoru byla měřena velikost a průběh dynamického tlaku pomocí Prandtlovy trubice napojené na mikromanometr 0–580 Pa firmy Airflow. Díky těmto naměřeným hodnotám dynamických tlaků byl proveden výpočet množství vzduchu v sacím kanálu vzduchového ventilátoru.

V měřících místech byla měřená teplota vzdušiny termočlánkem typu „K“ napojeným na digitální teploměr firmy Anritsu. Statický tlak spalin v měřících místech byl měřen manometrem  $\pm 8$  kPa firmy OMEGA. Atmosférický tlak byl měřen digitálním barometrem firmy Ahlborn. Naměřený atmosférický tlak byl 98,8 kPa. Hustota vzduchu byla stanovena na základě měření okolních podmínek, kdy vzduch dosahoval relativní vlhkosti 80 %.

## 4.2 Měření tlaku vzduchu ve vzduchovém traktu kotle

Schéma vzduchového traktu kotle s vyznačením měřících míst je na Obrázek 4-1.



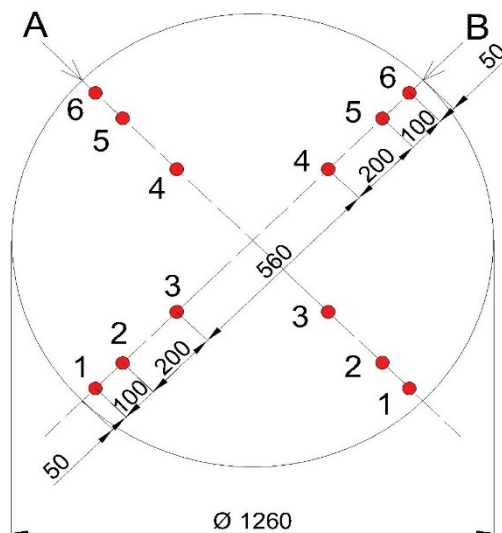
Obrázek 4-1 Schéma měřících míst

#### 4.2.1 Statické tlaky vzduchu byly měřeny v následujících místech vzduchového traktu kotle

Statický tlak v místě nasávání vnitřního vzduchu z kotelny. Měření bylo provedeno cca 500 mm za drátěnou mřížkou umístěnou v sání vzduchu z kotelny ve výškové úrovni +27 m. (viz Obrázek 4-2)



Obrázek 4-3 Měřicí místo statického tlaku



Obrázek 4-2 Rozmístění měřicích bodů

Statický tlak v místě měření množství vzduchu před regulační klapkou vzduchu v sání vzduchového ventilátoru ve výškové úrovni + 1,5 m. Statický tlak byl měřen v místě měření průtoku nasávaného vzduchu. Schéma rozdělení a označení měřicích bodů pro měření dynamického tlaku a průtoku nasávaného vzduchu (viz Obrázek 4-3). V tomto místě byly měřeny statické i dynamické tlaky i v průběhu měření „za studena“.

Statický tlak ve výtlaku vzduchu ze vzduchového ventilátoru ve výškové úrovni + 8 m těsně za uzavírací dvoulistou klapkou ve výtláčném potrubí a za odbočkou studeného vzduchu pro chlazení plynových hořáků. Dvoulistá klapka byla v průběhu měření „za tepla“ otevřená na 100 %.

Statický tlak ve výtlaku vzduchu ze vzduchového ventilátoru ve výškové úrovni +7,5 m před uzavírací dvoulistou klapkou při měření „za studena“. Diferenční tlak na ventilátoru byl při měření „za studena“ nastavován právě touto „uzavírací“ dvoulistou klapkou.

Statický tlak vzduchu před vstupem vzduchu do ohříváku vzduchu LUVO 1. Ve výškové úrovni + 15 m uprostřed vzduchové skříně na vstupu vzduchu do LUVO 1 (viz Obrázek 4-4).

Statický tlak vzduchu na výstupu vzduchu z ohříváku vzduchu LUVO 2 ve společné vzduchové skříni na pravé a levé straně kotle. V tomto místě jsou osazeny 3 provozní měření na společném kanálu před rozdělením vzduchu na pravou a levou stranou na vstupu do LUVO 1. S ohledem na spolehlivost měření nebylo v tomto místě prováděno nezávislé kontrolní měření. V tabulce naměřených výsledků je uvedena průměrná hodnota ze tří provozních tlakoměrů.



Obrázek 4-4 Měřící místo

### 4.3 Nastavení vzduchového režimu kotle K1 při měření „za tepla“

V průběhu měření vzduchového traktu kotle byly v provozu oba ohříváky vzduchu LUVO 1 i LUVO 2. Uzavírací dvoulistá klapa na výstupu ze vzduchového ventilátoru musela být trvale otevřena na 100 %. Obtokové klapky LUVO byly nastaveny tak, aby veškerý vzduch protékal přes LUVO 1 a následně přes LUVO 2. Obtokové klapky LUVO 1 byly obě uzavřeny na 0 %. Regulace množství vzduchu do kotle se provádí škrticí regulační klapkou v sání vzduchového ventilátoru. Ve výtlačném potrubí vzduchu na výstupu vzduchu z LUVO 1 a LUVO 2 se reguluje konstantní tlak vzduchu regulačními klapkami na jednotlivých plynových hořácích.

Regulační klapky (dvojitá listová klapka) v sání vzduchového ventilátoru jsou v sacím hrdle ventilátoru těsně před vstupem vzduchu do vzduchového ventilátoru. Z tohoto důvodu nemělo smysl měřit tlak v sání ventilátoru, protože rychlostní a tlakové pole v tomto úseku potrubí (za škrticí dvojitou klapkou v sání) je velmi neuspořádané.

Jedinou možností změření charakteristiky ventilátoru by bylo škrcení ve výtlačku vzduchového ventilátoru uzavírací klapkou na úrovni +7 m. Toto by však mohlo ohrozit chod kotle ve vazbě na nastavené blokady. Stanovení charakteristiky by bylo možné v tomto případě ověřit až při odstaveném kotli.

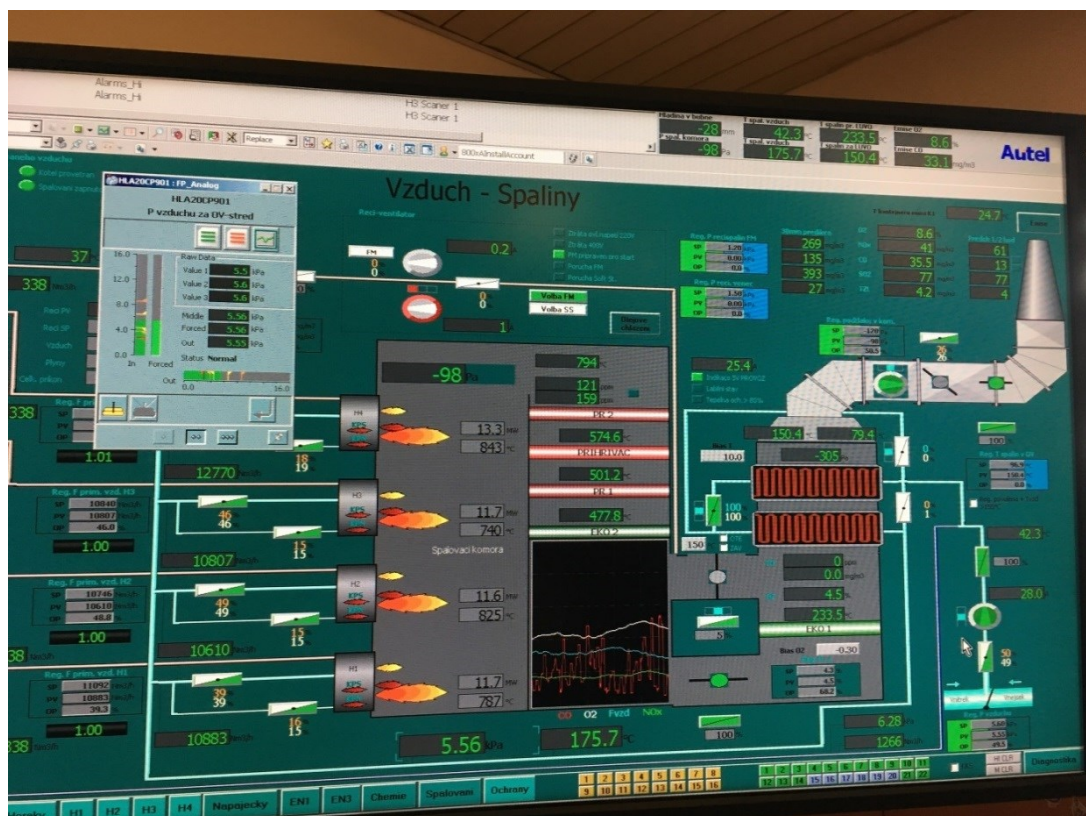
#### 4.4 Provozní režimy v průběhu měření „za tepla“

Číslování jednotlivých zkoušek	Výkon kotle provozní měření [t. h <sup>-1</sup> ]	Provozní měření množství vzduchu [Nm <sup>3</sup> . h <sup>-1</sup> ]	Měření množství vzduchu VŠB [Nm <sup>3</sup> . h <sup>-1</sup> ]
Zkouška A	44,26	47 262	58 299
Zkouška B	58,67	60 699	75 729
Zkouška C	63,95	71 957	85 382
Zkouška D	63,80	80 938	96 104

Tabulka 4 Provozní režimy kotle

#### 4.5 Průběh měření „za tepla“

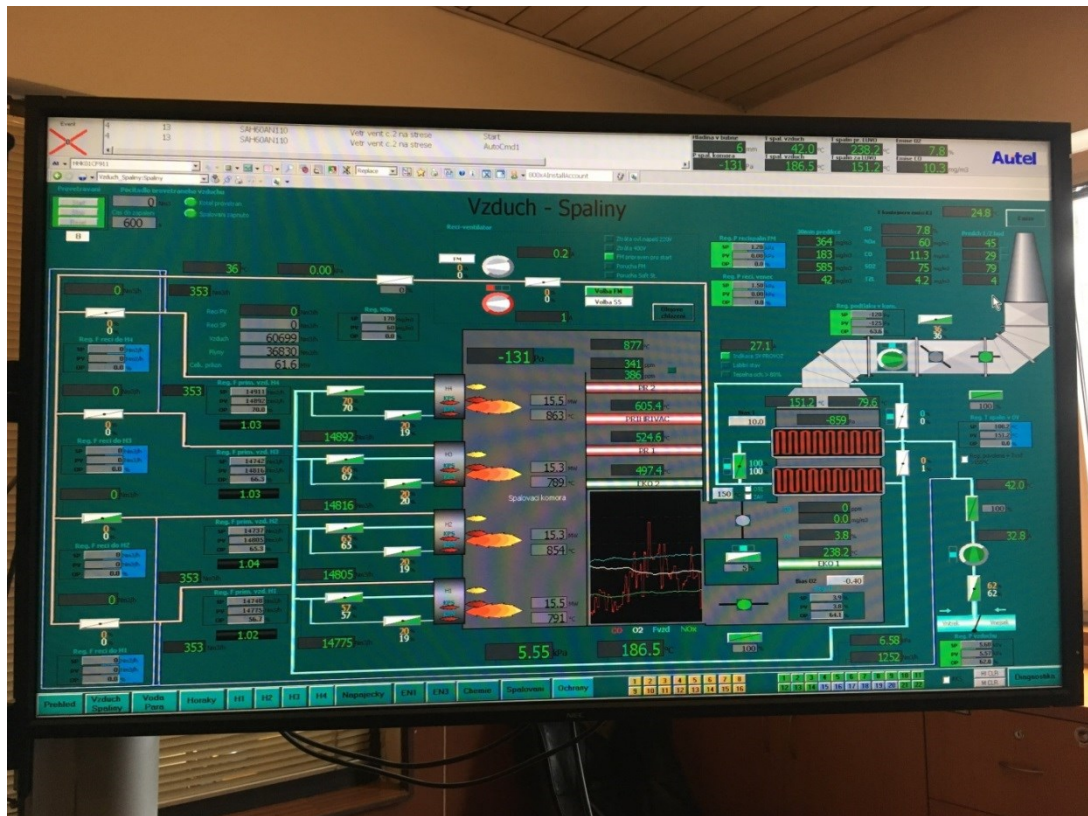
**Zkouška A** Výkon kotle 44,26 t/h páry, množství vzduchu 40 tis m<sup>3</sup>.hod<sup>-1</sup>



Obrázek 4-5 Zkouška A

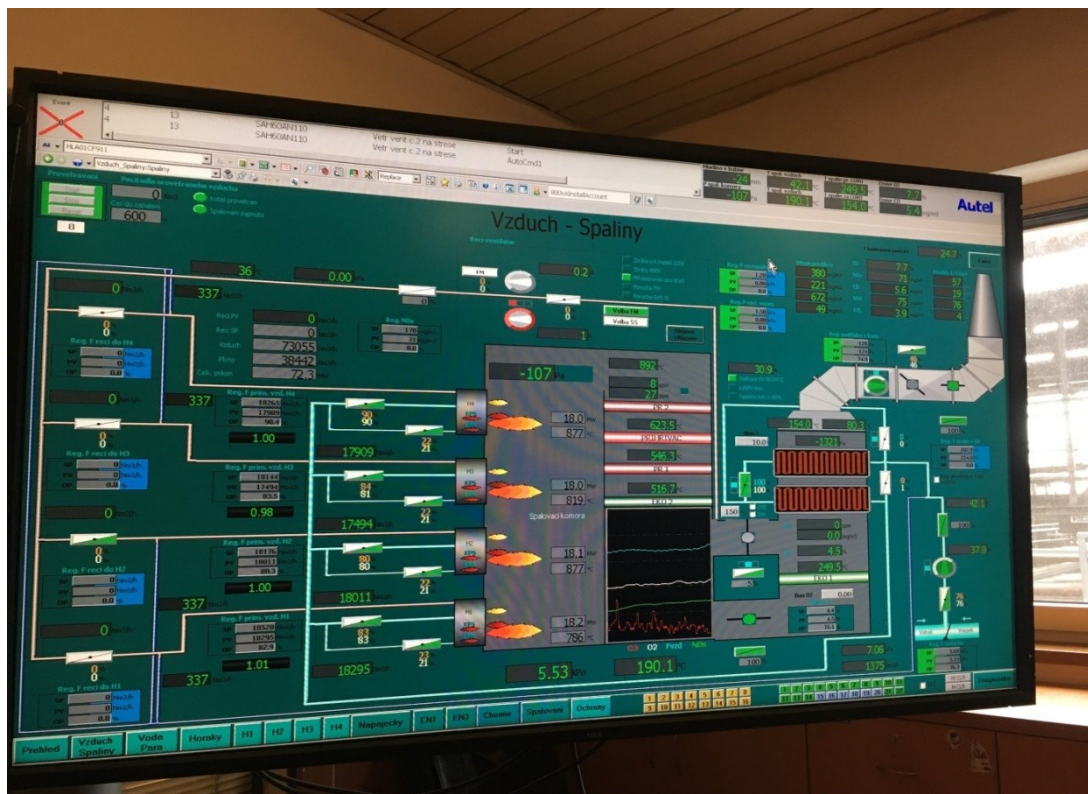


**Zkouška B** Výkon kotle 58,67 t/h páry, množství vzduchu 50 tis m<sup>3</sup>.hod<sup>-1</sup>



Obrázek 4-6 Zkouška B

**Zkouška C** Výkon kotle 63,95 t/h páry, množství vzduchu 60 tis m<sup>3</sup>.hod<sup>-1</sup>



Obrázek 4-7 Zkouška C



[illegible]

### Obrázek 4-8 Zkouška D

**Nastavení průtoku č. 1** Otevření dvoulisté klapky na výstupu vzduchu ze vzduchového ventilátoru na 50 %. Klapky na sání vzduchového ventilátoru otevřeny trvale na 100 %. Sání vzduchu z kotelny.

**Nastavení průtoku č. 2** Otevření dvoulisté klapky na výstupu vzduchu ze vzduchového ventilátoru na 100 %. Klapky na sání vzduchového ventilátoru otevřeny trvale na 100 %. Sání vzduchu z kotelny.

**Nastavení průtoku č. 3** Otevření dvoulisté klapky na výstupu vzduchu ze vzduchového ventilátoru na 32 %. Klapky na sání vzduchového ventilátoru otevřeny trvale na 100 %. Sání vzduchu z kotelny.

**Nastavení průtoku č. 4** Otevření dvoulisté klapky na výstupu vzduchu ze vzduchového ventilátoru na 20 %. Klapky na sání vzduchového ventilátoru otevřeny trvale na 100 %. Sání vzduchu z kotelny.

**Nastavení průtoku č. 1a** Otevření dvoulisté klapky na výstupu vzduchu ze vzduchového ventilátoru na 10 %. Klapky na sání vzduchového ventilátoru otevřeny trvale na 100 %. Sání vzduchu z kotelný.

#### 4.7 Výsledky měření „za tepla“

Výsledky měření za tepla jsou uvedeny v **Příloha B** a v ní jsou obsaženy výsledky měření pracovních bodů vzduchového ventilátoru, průtoky vzduchu a tlakové ztráty vzduchového traktu kotle při měření.

#### 4.8 Výsledky měření „za studena“

Výsledky měření za studena jsou uvedeny v **Příloha C** a v ní jsou obsaženy výsledky měření charakteristiky vzduchového ventilátoru, průtoky vzduchu a diferenční tlaky na vzduchovém ventilátoru kotle při měření.

#### 4.9 Závěr měření

Maximální množství vzduchu přivedeného do kotle je podle provozního měření  $80\,000\text{ m}^3_{\text{N}}\cdot\text{hod}^{-1}$ . Při tomto množství dosáhl kotel výkonu 63 t/h páry. Dosažitelný výkon je závislý na složení a kvalitativních znacích spalovaného plynu. Uvedené množství vzduchu je z provozního hlediska maximální dosažitelné. Všechny regulační klapky byly při maximálním výkonu otevřeny naplno (100 %). Za současného stavu by mohlo být dosažitelné množství vzduchu mírně vyšší při použití obtoku LUVO 1, ale toto navýšení bude velmi malé, protože odpor (tlaková ztráta) LUVO 1 na straně vzduchu je cca 0,5 kPa.

Provozní měření množství vzduchu vykazuje v porovnání s měřením VŠB-TU o cca 18 % nižší hodnoty, při nižších výkonech je provozní měření množství nasávaného vzduchu o 24 % nižší (viz Tabulka)

Za provozu kotle byly změřeny pracovní body ventilátoru, bohužel mezi sacím hrdlem ventilátoru a regulační škrtkou klapkou je velmi krátký úsek vzduchového kanálu, který neumožňuje objektivně změřit podtlak v sání vzduchového ventilátoru a tím stanovit charakteristiku ventilátoru. Proto bylo pokračováno v měření charakteristiky ventilátoru při odstaveném kotli tzv. „za studena“ dne 28. 11. 2018. Parametry ventilátoru se shodují.

Instalace parního ohříváku vzduchu ve výtlačném potrubí vzduchového ventilátoru zvýší tlakovou ztrátu vzduchového traktu kotle o cca 0,5 až 1 kPa. Při

stávajícím nasávání vzduchu zevnitř z kotelny dojde ke snížení množství vzduchu dodávaného ventilátorem do plynových hořáků o cca 10 až 15 %. Pokud bude nasáván vzduch z venkovního prostoru v chladnějším období, bude mít ventilátor vzhledem k větší hustotě nasávaného vzduchu lepší provozní podmínky a výše uvedené snížení výkonu se odstraní.

## 5 Stechiometrie spalování

Cílem stechiometrie spalování je stanovení objemu vzduchu pro spalování jednotlivého množství paliva a objemu spalin, které při tomto procesu vznikají. Vzorce a postupy výpočtů v této kapitole jsou čerpány z literatury [1].

### 5.1 Zemní plyn

Složení zemního plynu:

Zemní plyn		
Výhřevnost	MJ/Nm <sup>3</sup>	33,48
H <sub>2</sub>	%	0,0
CH <sub>4</sub>	%	93,0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	%	3,0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	%	1,0
CO <sub>2</sub>	%	1,0
N <sub>2</sub>	%	2,0
O <sub>2</sub>	%	max. 1,0

Tabulka 5 Složení zemního plynu

Množství kyslíku pro spalování:

$$V_{O_2,t} = 2 \cdot CH_4 + \frac{14}{4} \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_8 \quad (1)$$

$$V_{O_2,t} = 2 \cdot 0,93 + \frac{14}{4} \cdot 0,03 + 5 \cdot 0,01 = 2,015 \frac{m_{N,O_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Množství teoretického vzduchu suchého:

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} = 9,595 \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (2)$$

Přebytek vzduchu:

$$n = 1 + \frac{V_{sp,t}}{V_{vz,t}} \cdot \frac{O_2}{0,21 - O_2} \quad (-) \quad (3)$$

$$n = 1 + \frac{8,536}{9,595} \cdot \frac{0,077}{0,21 - 0,077} = 1,515 \quad (-)$$

### Součinitel vlhkosti

Relativní vlhkost spalovacího vzduchu je  $\varphi = 30 \%$  a teplota  $t = 36^\circ\text{C}$ . Podle tabulky 4-3 na straně 40 určíme parciální tlak vodní páry. [1] Parciální tlak je roven  $p'' = 0,0042416 \text{ MPa}$ .

$$\nu = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} p''} = 1 + \frac{30}{100} \cdot \frac{0,0042416}{0,101325 - \frac{30}{100} 0,0042416} = 1,013 \text{ (-)} \quad (4)$$

### Množství skutečného vzduchu suchého:

$$V_{vz,s}^s = V_{vz,t}^s \cdot n = 9,595 \cdot 1,515 = \mathbf{14,536} \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (5)$$

### Množství teoretického vzduchu vlhkého:

$$V_{vz,t}^v = V_{vz,t}^s \cdot \nu = 9,595 \cdot 1,013 = \mathbf{9,720} \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (6)$$

### Množství skutečného vzduchu vlhkého:

$$V_{vz,s}^v = V_{vz,t}^s \cdot \nu \cdot n = 9,595 \cdot 1,013 \cdot 1,515 = \mathbf{14,726} \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (7)$$

### Množství spalín teoretických suchých:

$$V_{CO_2,t} = CO_2 + 0,994 \cdot (CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8) + 0,0003 \cdot V_{vz,t}^s \quad (8)$$

$$V_{CO_2,t} = 0,01 + 0,994 \cdot (0,93 + 2 \cdot 0,03 + 3 \cdot 0,01) + 0,0003 \cdot 9,595 = \mathbf{1,027} \frac{m_{N,CO_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{N_2,t} = N_2 + 0,7805 \cdot V_{vz,t}^s = 0,02 + 0,7805 \cdot 9,595 = \mathbf{7,509} \frac{m_{N,N_2}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (9)$$

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2,t} + V_{N_2,t} = 1,0268 + 7,513 = \mathbf{8,536} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (10)$$

### Množství spalín teoretických vlhkých:

$$V_{H_2O,t} = 2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + V_{vz,t}^s \cdot (\nu - 1) \quad (11)$$

$$V_{H_2O,t} = 2 \cdot 0,93 + 3 \cdot 0,03 + 4 \cdot 0,01 + 9,595 \cdot (1,013 - 1) = \mathbf{2,115} \frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{sp,t}^v = V_{sp,t}^s + V_{H_2O,t} = 8,536 + 2,115 = \mathbf{10,651} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (12)$$

Koncentrace spalin teoretických vlhkých:

$$x_{CO_2,t} = \frac{V_{CO_2,t}}{V_{sp,t}^v} \cdot 100 = \frac{1,027}{10,651} \cdot 100 = 9,64 \% \quad (13)$$

$$x_{N_2,t} = \frac{V_{N_2,t}}{V_{sp,t}^v} \cdot 100 = \frac{7,509}{10,651} \cdot 100 = 70,50 \% \quad (14)$$

$$x_{H_2O,t} = \frac{V_{H_2O,t}}{V_{sp,t}^v} \cdot 100 = \frac{2,115}{10,651} \cdot 100 = 19,86 \% \quad (15)$$

Množství spalin skutečných suchých:

$$V_{sp,s}^s = V_{sp,t}^s + (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s \quad (16)$$

$$V_{sp,s}^s = 8,536 + (1,515 - 1) \cdot 9,595 = \mathbf{13,477} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Množství spalin skutečných vlhkých:

$$V_{H_2O,s} = 2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + V_{vz,t}^s \cdot (v - 1) \cdot n \quad (17)$$

$$V_{H_2O,s} = 2 \cdot 0,93 + 3 \cdot 0,03 + 4 \cdot 0,01 + 9,595 \cdot (1,013 - 1) \cdot 1,515 = \mathbf{2,179} \frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{sp,s}^v = V_{sp,s}^s + V_{H_2O,s} = 13,477 + 2,179 = \mathbf{15,656} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (18)$$

Koncentrace spalin skutečných vlhkých:

$$V_{CO_2,s} = CO_2 + 0,994 \cdot (CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8) + 0,0003 \cdot V_{vz,t}^s \cdot n \quad (19)$$

$$V_{CO_2,s} = 0,01 + 0,994 \cdot (0,93 + 2 \cdot 0,03 + 3 \cdot 0,01) + 0,0003 \cdot 9,595 \cdot 1,515$$

$$V_{CO_2,s} = \mathbf{1,028} \frac{m_{N,CO_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{N_2,s} = N_2 + 0,7805 \cdot V_{vz,t}^s \cdot n \quad (20)$$

$$V_{N_2,s} = 0,02 + 0,7805 \cdot 9,595 \cdot 1,515 = \mathbf{11,366} \frac{m_{N,N_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{O_2,s} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 0,21 \cdot (1,515 - 1) \cdot 9,595 = \mathbf{1,038} \frac{m_{N,O_2}^3}{m_{N,pal}^3} \quad (21)$$

$$x_{CO_2,s} = \frac{V_{CO_2,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{1,028}{15,656} \cdot 100 = 6,568 \% \quad (22)$$

$$x_{N_2,s} = \frac{V_{N_2,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{11,366}{15,656} \cdot 100 = 72,596 \% \quad (23)$$

$$x_{H_2O,s} = \frac{V_{H_2O,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{2,179}{15,656} \cdot 100 = 13,918 \% \quad (24)$$

$$x_{O_2,s} = \frac{V_{O_2,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{1,038}{15,656} \cdot 100 = 6,628 \% \quad (25)$$

## 5.2 Vysokopecní plyn

Složení zemního plynu:

Vysokopecní plyn		
Výhřevnost	MJ/Nm <sup>3</sup>	2,5-3,8
H <sub>2</sub>	%	3,2
CO	%	21,0
CO <sub>2</sub>	%	19,8
N <sub>2</sub>	%	55,3

Tabulka 6 Složení vysokopecního plynu

Množství kyslíku pro spalování:

$$V_{O_2,t} = 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2$$

$$V_{O_2,t} = 0,5 \cdot 0,21 + 0,5 \cdot 0,032 = 0,121 \frac{m_{N,O_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Množství teoretického vzduchu suchého:

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} = 0,576 \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Přebytek vzduchu:

$$n = 1 + \frac{V_{sp,t}}{V_{vz,t}} \cdot \frac{O_2}{0,21 - O_2} \quad (-)$$

$$n = 1 + \frac{1,411}{0,576} \cdot \frac{0,047}{0,21 - 0,047} = 1,706 \quad (-)$$

### Součinitel vlhkosti

Relativní vlhkost spalovacího vzduchu je  $\varphi = 30 \%$  a teplota  $t = 36^\circ\text{C}$ . Podle tabulky 4-3 na straně 40 určíme parciální tlak vodní páry. [1] Parciální tlak je roven  $p'' = 0,0042416 \text{ MPa}$ .

$$\nu = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} p''} = 1 + \frac{30}{100} \cdot \frac{0,0042416}{0,101325 - \frac{30}{100} 0,0042416} = 1,013 (-)$$

### Množství skutečného vzduchu suchého:

$$V_{vz,s}^s = V_{vz,t}^s \cdot n = 0,576 \cdot 1,706 = \mathbf{0,983} \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$$

### Množství teoretického vzduchu vlhkého:

$$V_{vz,t}^v = V_{vz,t}^s \cdot \nu = 0,576 \cdot 1,013 = \mathbf{0,584} \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$$

### Množství skutečného vzduchu vlhkého:

$$V_{vz,s}^v = V_{vz,t}^s \cdot \nu \cdot n = 0,576 \cdot 1,013 \cdot 1,706 = \mathbf{0,996} \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$$

### Množství spalín teoretických suchých:

$$V_{CO_2,t} = CO_2 + 0,994 \cdot CO + 0,0003 \cdot V_{vz,t}^s$$

$$V_{CO_2,t} = 0,198 + 0,21 + 0,0003 \cdot 0,576 = \mathbf{0,408} \frac{m_{N,CO_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{N_2,t} = N_2 + 0,7805 \cdot V_{vz,t}^s = 0,553 + 0,7805 \cdot 0,576 = \mathbf{1,003} \frac{m_{N,N_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2,t} + V_{N_2,t} = 0,408 + 1,003 = \mathbf{1,411} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$$

### Množství spalín teoretických vlhkých:

$$V_{H_2O,t} = H_2 + V_{vz,t}^s \cdot (\nu - 1)$$

$$V_{H_2O,t} = 0,032 + 0,576 \cdot (1,013 - 1) = \mathbf{0,039} \frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{sp,t}^v = V_{sp,t}^s + V_{H_2O,t} = 1,411 + 0,039 = \mathbf{1,450} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Koncentrace spalin teoretických vlhkých:

$$x_{CO_2,t} = \frac{V_{CO_2,t}}{V_{sp,t}^v} \cdot 100 = \frac{0,408}{1,450} \cdot 100 = 28,142 \%$$

$$x_{N_2,t} = \frac{V_{N_2,t}}{V_{sp,t}^v} \cdot 100 = \frac{1,003}{1,450} \cdot 100 = 69,135 \%$$

$$x_{H_2O,t} = \frac{V_{H_2O,t}}{V_{sp,t}^v} \cdot 100 = \frac{0,039}{1,450} \cdot 100 = 2,723 \%$$

Množství spalin skutečných suchých:

$$V_{sp,s}^s = V_{sp,t}^s + (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 1,411 + (1,706 - 1) \cdot 0,576 = \mathbf{2,407} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Množství spalin skutečných vlhkých:

$$V_{H_2O,s} = H_2 + V_{vz,t}^s \cdot (v - 1) \cdot n$$

$$V_{H_2O,s} = 0,032 + 0,576 \cdot (1,013 - 1) \cdot 1,706 = \mathbf{0,045} \frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{sp,s}^v = V_{sp,s}^s + V_{H_2O,s} = 2,407 + 0,045 = \mathbf{2,452} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Koncentrace spalin skutečných vlhkých:

$$V_{CO_2,s} = CO_2 + 0,994 \cdot CO + 0,0003 \cdot V_{vz,t}^s \cdot n$$

$$V_{CO_2,s} = 0,198 + 0,21 + 0,0003 \cdot 0,576 \cdot 1,706 = \mathbf{0,408} \frac{m_{N,CO_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{N_2,s} = N_2 + 0,7805 \cdot V_{vz,t}^s \cdot n = 0,553 + 0,7805 \cdot 0,576 \cdot 1,706 = \mathbf{1,320} \frac{m_{N,N_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{O_2,s} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 0,21 \cdot (1,706 - 1) \cdot 0,576 = \mathbf{0,085} \frac{m_{N,O_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$x_{CO_2,s} = \frac{V_{CO_2,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{0,408}{2,452} \cdot 100 = 16,653 \%$$

$$x_{N_2,s} = \frac{V_{N_2,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{1,320}{2,452} \cdot 100 = 53,848 \%$$

$$x_{H_2O,s} = \frac{V_{H_2O,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{0,045}{2,452} \cdot 100 = 1,826 \%$$

$$x_{O_2,s} = \frac{V_{O_2,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{0,085}{2,452} \cdot 100 = 3,484 \%$$



### 5.3 Koksárenský plyn

Složení  
plynu:

koksárenského

Koksárenský plyn		
Výhřevnost	MJ/Nm <sup>3</sup>	16,2-17,8
Hustota	kg/Nm <sup>3</sup>	0,55
H <sub>2</sub>	%	55,0
CH <sub>4</sub>	%	25,0
CO	%	5,5
CO <sub>2</sub>	%	2,5
N <sub>2</sub>	%	9,0
O <sub>2</sub>	%	max. 1,0

Tabulka 7 Složení koksárenského plynu

Množství kyslíku pro spalování:

$$V_{O_2,t} = 2 \cdot CH_4 + 0,5 \cdot H_2 + 0,5 \cdot CO - O_2$$

$$V_{O_2,t} = 2 \cdot 0,25 + 0,5 \cdot 0,55 + 0,5 \cdot 0,055 - 0,01 = \mathbf{0,793} \frac{m_{N,O_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Množství teoretického vzduchu suchého:

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} = \mathbf{3,774} \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Přebytek vzduchu:

$$n = 1 + \frac{V_{sp,t}}{V_{vz,t}} \cdot \frac{O_2}{0,21 - O_2} \quad (-)$$

$$n = 1 + \frac{3,365}{3,774} \cdot \frac{0,077}{0,21 - 0,077} = 1,516 \quad (-)$$

Součinitel vlhkosti

Relativní vlhkost spalovacího vzduchu je  $\varphi = 30 \%$  a teplota  $t = 36^\circ\text{C}$ . Podle tabulky 4-3 na straně 40 určíme parciální tlak vodní páry. Parciální tlak je roven  $p'' = 0,0042416 \text{ MPa}$ .

$$\nu = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} p''} = 1 + \frac{30}{100} \cdot \frac{0,0042416}{0,101325 - \frac{30}{100} \cdot 0,0042416} = 1,013 \quad (-)$$

Množství skutečného vzduchu suchého:

$$V_{vz,s}^S = V_{vz,t}^S \cdot n = 3,774 \cdot 1,516 = \mathbf{5,721} \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Množství teoretického vzduchu vlhkého:

$$V_{vz,t}^v = V_{vz,t}^S \cdot v = 3,774 \cdot 1,013 = \mathbf{3,823} \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Množství skutečného vzduchu vlhkého:

$$V_{vz,s}^v = V_{vz,t}^S \cdot v \cdot n = 3,774 \cdot 1,013 \cdot 1,516 = \mathbf{5,795} \frac{m_{N,vz}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Množství spalin teoretických suchých:

$$V_{CO_2,t} = CO_2 + 0,994 \cdot (CH_4 + CO) + 0,0003 \cdot V_{vz,t}^S$$

$$V_{CO_2,t} = 0,025 + 0,994 \cdot (0,25 + 0,055) + 0,0003 \cdot 3,774 = \mathbf{0,330} \frac{m_{N,CO_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{N_2,t} = N_2 + 0,7805 \cdot V_{vz,t}^S = 0,09 + 0,7805 \cdot 3,774 = \mathbf{3,035} \frac{m_{N,N_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{sp,t}^S = V_{CO_2,t} + V_{N_2,t} = 0,330 + 3,035 = \mathbf{3,365} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Množství spalin teoretických vlhkých:

$$V_{H_2O,t} = H_2 + 2 \cdot CH_4 + V_{vz,t}^S \cdot (v - 1)$$

$$V_{H_2O,t} = 0,55 + 2 \cdot 0,25 + 3,774 \cdot (1,013 - 1) = \mathbf{1,099} \frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{sp,t}^v = V_{sp,t}^S + V_{H_2O,t} = 3,365 + 1,099 = \mathbf{4,464} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Koncentrace spalin teoretických vlhkých:

$$x_{CO_2,t} = \frac{V_{CO_2,t}}{V_{sp,t}^v} \cdot 100 = \frac{0,330}{4,464} \cdot 100 = 7,384 \%$$

$$x_{N_2,t} = \frac{V_{N_2,t}}{V_{sp,t}^v} \cdot 100 = \frac{3,035}{4,464} \cdot 100 = 67,996 \%$$

$$x_{H_2O,t} = \frac{V_{H_2O,t}}{V_{sp,t}^v} \cdot 100 = \frac{1,099}{4,464} \cdot 100 = 24,620 \%$$

Množství spalin skutečných suchých:

$$V_{sp,s}^s = V_{sp,t}^s + (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 3,365 + (1,516 - 1) \cdot 3,774 = \mathbf{5,101} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Množství spalin skutečných vlhkých:

$$V_{H_2O,s} = H_2 + 2 \cdot CH_4 + V_{vz,t}^s \cdot (v - 1) \cdot n$$

$$V_{H_2O,s} = 0,55 + 2 \cdot 0,25 + 3,774 \cdot (1,013 - 1) \cdot 1,516 = \mathbf{1,124} \frac{m_{N,H_2O}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{sp,s}^v = V_{sp,s}^s + V_{H_2O,s} = 5,101 + 1,124 = \mathbf{6,226} \frac{m_{N,sp}^3}{m_{N,pal}^3}$$

Koncentrace spalin skutečných vlhkých:

$$V_{CO_2,s} = CO_2 + 0,994 \cdot (CH_4 + CO) + 0,0003 \cdot V_{vz,t}^s \cdot n$$

$$V_{CO_2,s} = 0,025 + 0,994 \cdot (0,25 + 0,055) + 0,0003 \cdot 3,774 \cdot 1,516$$

$$V_{CO_2,s} = \mathbf{0,330} \frac{m_{N,CO_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{N_2,s} = N_2 + 0,7805 \cdot V_{vz,t}^s \cdot n = 0,09 + 0,7805 \cdot 3,774 \cdot 1,516 = \mathbf{4,555} \frac{m_{N,N_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$V_{O_2,s} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 0,21 \cdot (1,516 - 1) \cdot 3,774 = \mathbf{0,055} \frac{m_{N,O_2}^3}{m_{N,pal}^3}$$

$$x_{CO_2,s} = \frac{V_{CO_2,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{0,330}{6,226} \cdot 100 = 5,304 \%$$

$$x_{N_2,s} = \frac{V_{N_2,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{4,555}{6,226} \cdot 100 = 73,168 \%$$

$$x_{H_2O,s} = \frac{V_{H_2O,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{1,124}{6,226} \cdot 100 = 18,060 \%$$

$$x_{O_2,s} = \frac{V_{O_2,s}}{V_{sp,s}^v} \cdot 100 = \frac{0,055}{6,226} \cdot 100 = 0,891 \%$$

## 6 Výpočet kotle

### 6.1 Výpočet měrné tepelné kapacity vlhkých spalin

Měrná tepelná kapacita je určena při teplotě 154 °C a tlaku 101,325 kPa pomocí lineární interpolace hodnot z tabulky 4-9 na straně 47. [1]

$$c_{p,x} = \frac{c_{px200} - c_{px100}}{200 - 100} \cdot 54 + c_{px100} \quad (26)$$

$$c_{p,CO_2} = \frac{1,786 - 1,699}{100} \cdot 54 + 1,699 = 1,746 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{p,O_2} = \frac{1,337 - 1,319}{100} \cdot 54 + 1,319 = 1,329 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{p,N_2} = \frac{1,299 - 1,295}{100} \cdot 54 + 1,295 = 1,297 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{p,H_2O} = \frac{1,523 - 1,506}{100} \cdot 54 + 1,506 = 1,515 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{p,sp} = c_{p,CO_2} \cdot x_{CO_2} + c_{p,O_2} \cdot x_{O_2} + c_{p,N_2} \cdot x_{N_2} + c_{p,H_2O} \cdot x_{H_2O} \quad (27)$$

$$c_{p,sp,ZP} = 1,746 \cdot \frac{6,568}{100} + 1,329 \cdot \frac{6,628}{100} + 1,297 \cdot \frac{72,596}{100} + 1,515 \cdot \frac{13,918}{100}$$

$$c_{p,sp,ZP} = 1,356 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{p,sp,VP} = 1,746 \cdot \frac{16,653}{100} + 1,329 \cdot \frac{3,484}{100} + 1,297 \cdot \frac{53,848}{100} + 1,515 \cdot \frac{1,826}{100}$$

$$c_{p,sp,VP} = 1,063 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{p,sp,KP} = 1,746 \cdot \frac{5,304}{100} + 1,329 \cdot \frac{0,891}{100} + 1,297 \cdot \frac{73,168}{100} + 1,515 \cdot \frac{18,060}{100}$$

$$c_{p,sp,KP} = 1,327 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

### 6.2 Tepelné ztráty kotle a účinnost

#### Ztráta chemickým nedopalem

Množství, CO ve spalinách bylo během Zkoušky č.1 naměřeno  $\dot{m}_{CO} = 5,6 \text{ mg}$ . Při referenčním obsahu kyslíku pro plynná paliva 3 %.

$$\rho_{CO} = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\dot{m}_{CO} = 5,6 \text{ mg} \cdot m_R^{-3} = \frac{5,6}{1,25} = 4,48 \text{ ppm}$$

$$Z_{co} = \dot{m}_{CO} \cdot \frac{(21 - O_{2m\ddot{e}r})}{(21 - O_{2ref})} = 4,48 \cdot \frac{(21 - 7,7)}{(21 - 3)} = 3,31 \cdot 10^{-4} \quad (28)$$

#### Ztráta komínová [1]

$$Z_{K,KP} = \frac{V_{sp,s}^{vp} \cdot cp_2 \cdot (100 - 25)}{Q_i^r} \quad (29)$$

$$Z_{K,KP} = \frac{6,226 \cdot 1,327 \cdot (100 - 25)}{17000} = 0,0365$$

#### Ztráta sdílením tepla do okolí

Ztrátu určí podle literatury [1], diagramu 5-1 na straně 66 pro jmenovitý parní výkon 80 [t/h].

$$Z_{svj} = 0,0082$$

#### Účinnost kotle

$$\eta_k = 1 - Z_{co} - Z_{K,KP} - Z_{svj} \quad (30)$$

$$\eta_k = 1 - 0,000331 - 0,0365 - 0,0082 = 0,955$$

### 6.3 Výrobní teplo páry

Výrobní teplo páry nebo také celkový tepelný výkon kotle, se vypočítá z rovnice (31). [1]

$$Q_{V\dot{y}r} = \dot{m}_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + \dot{m}_{sp} \cdot (i_{sp1} - i_{sp2}) + \dot{m}_{od} \cdot (i_{sk} - i_{nv}) \quad (31)$$

$$\dot{m}_{pp} - \text{průtok vysokotlaké páry, } \dot{m}_{pp} = 80 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} = 22,22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{sp} - \text{průtok středotlaké páry, } \dot{m}_{sp} = 80 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} = 22,22 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{od} - \text{množství odluhu, } \dot{m}_{od} = 2,5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} = 0,694 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Jednotlivé entalpie pro daný tlak a teplotu jsem určil v programu EES, tyto hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 8. Hodnoty jsou dosazeny do rovnice (31)

$$Q_{V\dot{y}r} = 22,22 \cdot (3\,335 - 512,6) + 22,22 \cdot (3\,201 - 3\,023) + 0,694 \cdot (1\,485 - 512,6)$$

$$Q_{V\dot{y}r} = 67\,344,12 \text{ kW} = 67,344 \text{ MW}$$

		Teplota [°C]	Tlak [MPa]	Entalpie [kJ·kg <sup>-1</sup> ]
<b>Přehřátá pára</b>		$t_{pp} = 495 \text{ °C}$	$p_{pp} = 12 \text{ MPa}$	$i_{pp} = 3\,335 \text{ kJ·kg}^{-1}$
<b>Středotlaká pára</b>	<b>vstup</b>	$t_{sp1} = 378 \text{ °C}$	$p_{sp1} = 1,89 \text{ MPa}$	$i_{sp1} = 3\,201 \text{ kJ·kg}^{-1}$
	<b>výstup</b>	$t_{sp2} = 301 \text{ °C}$	$p_{sp2} = 2,07 \text{ MPa}$	$i_{sp2} = 3\,023 \text{ kJ·kg}^{-1}$
<b>Sytá kapalina</b>		$t_{sk} = 324 \text{ °C}$	$p_{sk} = 12,5 \text{ MPa}$	$i_{sk} = 1\,485 \text{ kJ·kg}^{-1}$
<b>Napájecí voda</b>		$t_{nv} = 120 \text{ °C}$	$p_{nv} = 12,7 \text{ MPa}$	$i_{nv} = 512,6 \text{ kJ·kg}^{-1}$

Tabulka 8 Fyzikální vlastnosti pro výpočet výrobního tepla páry

## 6.4 Výpočet množství paliva

$$M_{pal} = \frac{Q_{výr}}{Q_i \cdot \eta_k} \quad (32)$$

$$M_{pal} = \frac{67,344}{17 \cdot 0,955} = 4,148 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

## 7 Tepelná bilance přehřevu a potřebné množství páry

Pro určení fyzikálních vlastností veličin uvedených v Tabulka 9 jsem použil výpočtový software EES.

		Pára na vstup	Kondenzát	Vzduch na vstup (vz,1)	Vzduch na výstupu (vz,2)
<b>Tlak</b>	kpa	150	150	101,325	101,325
<b>Teplota</b>	°C	150	80	10	70
<b>Hustota</b>	$\rho \text{ [kg·m}^{-3}\text{]}$	0,778	971,8	1,247	1,028
<b>Měrná tepelná kapacita</b>	$c_p \text{ [kJ·kg}^{-1}\text{·K}^{-1}\text{]}$	2,016	4,194	1,006	1,009
<b>Dynamická viskozita</b>	$\eta \cdot 10^{-6} \text{ [kg·m}^{-1}\text{·s}^{-1}\text{]}$	14,16	354,5	17,72	20,56
<b>Kinetická viskozita</b>	$\nu_k \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{·s}^{-1}\text{]}$	18,20	0,3648	14,21	20,00
<b>Tepelná vodivost</b>	$\lambda \text{ [W·m}^{-1}\text{·K}^{-1}\text{]}$	0,02918	0,6562	0,02512	0,02952
<b>Prantlovo číslo</b>	Pr [-]	0,9782	2,266	0,7097	0,7027
<b>Entalpie páry</b>	$i \text{ [kJ·kg}^{-1}\text{]}$	2772	335	283,3	343,8
<b>Latentní teplo</b>	$i' \text{ [kJ·kg}^{-1}\text{]}$	2114	2308	-	-

Tabulka 9 Fyzikální vlastnosti vstupních a výstupních parametrů páry a kondenzátu

## 7.1 Tepelná bilance přehřevu

U tepelné bilance parního ohříváku vzduchu se vychází z teoretického předpokladu, že při zanedbání ztrát se teplo předané parou v ohříváku rovná teplo předanému do vzduchu.

$$Q_P = Q_{VZ} = Q_{POV} \quad (33)$$

Vzduch, který vstupuje do POV, má teplotu  $t_{vz1} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a bude se ohřívat na teplotu  $t_{vz2} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro zjednodušení je zanedbáno ohřátí vzduchu ve vzduchovém ventilátoru. [1]

$$Q_{POV} = V_{vz,s}^v \cdot \beta_{OVZ} \cdot c_{p,vz,stř} \cdot (t_{vz,2} - t_{vz,1}) \cdot M_{pal} \quad (34)$$

$$Q_{POV} = 5,795 \cdot 1,2 \cdot 1,298 \cdot (70 - 10) \cdot 4,14 = \mathbf{2\,242,131\,kW}$$

$$c_{p,vz1} = \frac{1,3-1,297}{100} \cdot 10 + 1,297 = 1,297 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{p,vz2} = \frac{1,3-1,297}{100} \cdot 70 + 1,297 = 1,299 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{p,vz,stř} = \frac{c_{p,vz2} + c_{p,vz1}}{2} \quad (35)$$

$$c_{p,vz,stř} = \frac{1,299 + 1,297}{2} = 1,298 \text{ kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

## 7.2 Potřebné množství páry

Množství páry, které je potřeba k ohřevu vzduchu pomocí parního ohříváku vzduchu o výkonu  $Q_{POV}$ , je vypočteno z rovnice (36). [1] Entalpie páry je vypočtená programem EES a uvedená v Tabulce 9.

$$Q_{POV} = \dot{m}_p \cdot \Delta i_p \quad (36)$$

$$\Delta i_p = i_p - i_k \quad (37)$$

$$\Delta i_p = 2\,772 - 335 = 2\,437 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\dot{m}_p = \frac{Q_{POV}}{\Delta i_p} \quad (38)$$

$$\dot{m}_p = \frac{2\,242,131}{2\,437} = \mathbf{0,989\,kg \cdot s^{-1}}$$

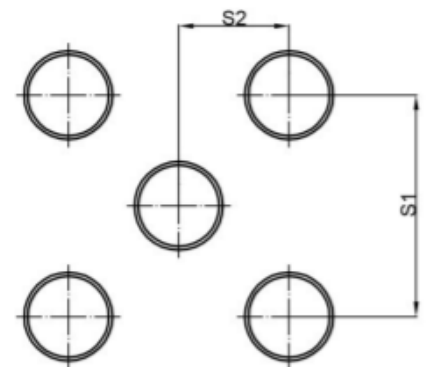
## 8 Tepelný výpočet parního ohříváku vzduchu

### 8.1 Návrh trubek parního ohříváku vzduchu

U tohoto provedení parního ohříváku vzduchu ohříváný spalovací vzduch proudí kolem ocelových trubek s kruhovým žebrováním. Teplonosné médium (pára) o výše uvedených parametrech, vstupuje do komory výměníku tepla a protéká teplosměnnými trubkami. Vystupuje z trubek výměníku výstupní komorou ve formě kondenzátu. Parní ohřívák je v celosvařovaném provedení. Žebrované ocelové trubky jsou zavařeny do trubkovnic. Zvolil jsem uložení trubek s přesazením (viz Obrázek 8-1). Na základě doporučení z literatury [1], [2], [4], jsem zvolil průměr, tloušťku stěny a materiál trubek, jako i výšku, tloušťku, materiál a rozteč žeber. Materiál trubky 11 373, materiál žeber 11 370. [13]

TR 30 x 2 – ČSN 42 67 11.1

- |                         |                         |
|-------------------------|-------------------------|
| • vnější průměr         | $D = 60 \text{ mm}$     |
| • vnější průměr trubky  | $d_2 = 30 \text{ mm}$   |
| • tloušťka stěny trubky | $t_{tr} = 2 \text{ mm}$ |
| • vnitřní průměr trubky | $d_1 = 26 \text{ mm}$   |
| • délka žebra           | $h = 15 \text{ mm}$     |
| • tloušťka žebra        | $t_z = 1 \text{ mm}$    |
| • rozteč mezi žebry     | $u = 3,5 \text{ mm}$    |



Obrázek 8-1 Uložení trubek s přesazením

#### 8.1.1 Návrh roztečí svazku trubek

Příčná rozteč svazku

$$s_0 = 70 \text{ mm}$$

Charakteristický průměr trubky [12]

$$d_a = D - 2 \cdot h \quad (39)$$

$$d_a = 60 - 2 \cdot 15 = 30 \text{ mm}$$

Podélná rozteč svazku trubek [2]

$$s_1 = (1,4 \text{ až } 2,0) \cdot D \quad (40)$$

$$s_1 = s_0 \cdot \sqrt{3} \quad (41)$$



$$s_1 = 70 \cdot \sqrt{3} = 120 \text{ mm}$$

$$s_2 = (1,0 \text{ až } 1,4) \cdot D \quad (42)$$

$$s_2 = \frac{s_0}{2} \quad (43)$$

$$s_2 = \frac{70}{2} = 35 \text{ mm}$$

## 8.2 Výpočet rychlosti proudění vzduchu mezi trubkami

Výpočet rychlosti proudění vzduchu mezi trubkami je proveden podle rovnice (44), která vychází z literatury [12]. Stejně tak výpočet charakteristických koeficientů rozteče a, b.

$$c_e = c_0 \cdot \frac{\rho_{vz,2}}{\rho_{vz,1}} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left(2 \cdot \frac{b}{a}\right)^2} - \frac{2}{a} - \frac{4 \cdot t_x \cdot h}{s_1 \cdot u} \right]^{-1} \quad (44)$$

$$c_e = 6 \cdot \frac{1,247}{1,028} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left(2 \cdot \frac{1,25}{4,33}\right)^2} - \frac{2}{4,33} - \frac{4 \cdot 1 \cdot 15}{130 \cdot 3,5} \right]^{-1} = 14,137 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$a = \frac{s_1}{d_a} \quad (45)$$

$$a = \frac{120}{30} = 4$$

$$b = \frac{s_2}{d_a} \quad (46)$$

$$b = \frac{35}{30} = 1,16$$

## 8.3 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně vzduchu

Výpočet Reynoldsova čísla [12]

$$Re_{d_a} = \frac{c_e \cdot d_a}{\nu_{k,stř,vz}} \quad (47)$$

$$Re_{d_a} = \frac{14,137 \cdot 0,03}{19,14 \cdot 10^{-6}} = 22\,158$$

$$\nu_{k,stř,vz} = \frac{\nu_{k,vz,1} + \nu_{k,vz,2}}{2} \quad (48)$$

$$\nu_{k,stř,vz} = \frac{17,72 + 20,56}{2} = 19,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

### Výpočet Nusseltova čísla při proudění mezi žebry

Při výpočtu součinitele přestupu tepla u žebrovaných trubek se vychází z Nusseltova kritéria. Tvar Nusseltova kritéria v tomto případě je následující (49). [12]

$$Nu_{da} = 0,38 \cdot Re_{da}^{0,6} \cdot \left[ \frac{(A_{Ri} + A_0)}{A} \right]^{-0,15} \cdot Pr_{vz,stř}^{1/3} \cdot f_4 \cdot f_n \quad (49)$$

$$\frac{A_{Ri}}{A} = \frac{2 \cdot h}{u} \cdot \left( 1 + \frac{h}{d_a} \right) \quad (50)$$

$$\frac{A_{Ri}}{A} = \frac{2 \cdot 15}{3,5} \cdot \left( 1 + \frac{15}{30} \right) = 12,86$$

$$\frac{A_0}{A} = 1 - \frac{t_z}{u} \quad (51)$$

$$\frac{A_0}{A} = 1 - \frac{1}{3,5} = 0,71$$

$$Pr_{vz,stř} = \frac{Pr_{vz,1} + Pr_{vz,2}}{2} = \frac{0,7097 + 0,7027}{2} = 0,7062 \quad (52)$$

$$Nu_{da} = 0,38 \cdot 22\,158^{0,6} \cdot (12,86 + 0,71)^{-0,15} \cdot 0,7062^{\frac{1}{3}} \cdot 0,99 \cdot 1,03$$

$$Nu_{da} = \mathbf{94,476}$$

### Součinitel přestupu tepla na straně vzduchu [12]

$$Nu = \frac{\alpha_a \cdot d_a}{\lambda} \quad (53)$$

$$\alpha_a = \frac{Nu_{da} \cdot \lambda_{95}}{d_a} \quad (54)$$

$$t_{st} = \frac{\left( \frac{t_{vz,1} + t_{vz,2}}{2} \right) + t_p}{2} = \frac{\left( \frac{10 + 70}{2} \right) + 150}{2} = 95 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (55)$$

V programu EES byla vypočítána tepelná vodivost  $\lambda$  pro  $t_{st} = 95 \text{ } ^\circ\text{C}$ , čemuž odpovídá  $\lambda_{95} = 0,03129 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$$\alpha_a = \frac{94,476 \cdot 0,03129}{0,03} = \mathbf{98,538 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

## 8.4 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně páry

### 8.4.1 Výpočet kondenzační části ohříváku

V této části parního ohříváče vzduchu bude docházet k největšímu přestupu tepla, využitím kondenzačního tepla páry. Pro výpočet kondenzace páry, je nezbytné určit teplotu blány kondenzátu na stěně trubky. Teplota určující při tlaku 150 kPa je  $t_{určující} = 111\text{ °C}$ . Pro tuto teplotu byly v programu EES vypočítány fyzikální vlastnosti blány, které jsou uvedeny v Tabulce 10.

		$t_{určující}$
<b>Tlak</b>	$p$ [kPa]	150
<b>Teplota</b>	$t$ [°C]	111
<b>Hustota</b>	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	950,2
<b>Dynamická viskozita</b>	$\eta \cdot 10^{-6}$ [kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	252,4
<b>Tepelná vodivost</b>	$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	0,6678
<b>Latentní teplo</b>	$i'$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	2227

Tabulka 10 Fyzikální vlastnosti určující teploty

#### Součinitel přestupu tepla na straně kondenzace páry

Je zde použit přímý výpočet součinitele přestupu tepla při kondenzaci páry na ploše trubky. [11] Tento součinitel je vyjádřen pomocí následující rovnice (56).

$$\alpha_{kond} = c \cdot \left( \frac{\lambda^3 \cdot g \cdot \rho \cdot i'}{\frac{\eta}{\rho} (t_p - t_s) \cdot l} \right)^{0,25} \quad (56)$$

Kde  $c$  je konstanta upravující vztah dle typu plochy kondenzace [11]. Pro tento případ je konstanta  $c = 1,13$ . Tato hodnota konstanty upravuje výše uvedený vztah pro kondenzaci na vertikální ploše. Písmeno  $l$  v čitateli vzorce udává uvažovanou délku trubek, ve kterých bude probíhat kondenzace, pro daný případ volím délku  $l = 1,3\text{ m}$ .

$$\alpha_{kond} = 1,13 \cdot \left( \frac{0,6678^3 \cdot 9,81 \cdot 950,2^2 \cdot 2,227 \cdot 10^6}{252,4 \cdot 10^{-6} \cdot (150 - 95) \cdot 1,3} \right)^{0,25} = 4\,799\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

## 8.5 Výpočet součinitele prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla vyjadřuje, jaké množství tepla pronikne konstrukcí na ploše 1 m<sup>2</sup> mezi dvěma médii o rozdílné teplotě. Tento součinitel je vypočítán podle následující rovnice (57) [12].

$$k = \left( \frac{1}{A_0 + A_{Ri} \cdot \eta_z} \cdot \frac{1}{\alpha_a} + \frac{d_a}{2 \cdot \lambda_{tr}} \cdot \ln \frac{d_a}{d_1} + \frac{d_a}{d_1} \cdot \frac{1}{\alpha_{kond}} \right)^{-1} \quad (57)$$

$$\varphi = \left( \frac{D}{d_a} - 1 \right) \cdot \left[ 1 + 0,35 \cdot \ln \left( \frac{D}{d_a} \right) \right] \quad (58)$$

$$\varphi = \left( \frac{60}{30} - 1 \right) \cdot \left[ 1 + 0,35 \cdot \ln \left( \frac{60}{30} \right) \right] = 1,243$$

$$X = \varphi \cdot \frac{d_a}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_a}{\lambda_{tr} \cdot t_z}} \quad (59)$$

$$X = 1,243 \cdot \frac{0,03}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 98,538}{44,36 \cdot 0,001}} = 1,242$$

$$\eta_z = \frac{\tanh X}{X} \quad (60)$$

$$\eta_z = \frac{\tanh 1,242}{1,242} = 0,681$$

$$k = \left( \frac{1}{0,71 + 12,86 \cdot 0,681} \cdot \frac{1}{98,538} + \frac{0,03}{2 \cdot 44,36} \cdot \ln \frac{0,03}{0,026} + \frac{0,03}{0,026} \cdot \frac{1}{4\,799} \right)^{-1}$$

$$k = 758,674 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

## 8.6 Plocha ohříváku vzduchu

Potřebná plocha ohříváku vzduchu

$$S'_{POV} = \frac{Q_{POV}}{k \cdot \Delta t_{stř,12}} \quad (61)$$

$$t_{stř,1} = \frac{t_p + t_k}{2} = \frac{150 + 80}{2} = 115 \, ^\circ C \quad (62)$$

$$t_{stř,2} = \frac{t_{vz,1} + t_{vz,2}}{2} = \frac{10 + 70}{2} = 40 \, ^\circ C$$

$$S'_{POV} = \frac{2\,242\,131}{758,67 \cdot (115 - 40)} = 39,404 \, m^2$$

### Výpočet plochy žebrované trubky

Vzhledem k dispozičnímu umístění parního ohříváku vzduchu volím činnou délku žebrované trubky  $l_{tr} = 1\text{ m}$ .

$$S_1 = \pi \cdot d_2 \cdot \frac{u - t_z}{2} \quad (63)$$

$$S_1 = \pi \cdot 30 \cdot \frac{3,5 - 1}{2} = \frac{75}{2} \pi$$

$$S_2 = \pi \cdot D \cdot \frac{t_z}{2} \quad (64)$$

$$S_2 = \pi \cdot 60 \cdot \frac{1}{2} = 30\pi$$

$$S_3 = \pi \cdot (R^2 - r_2^2) \quad (65)$$

$$S_3 = \pi \cdot (30^2 - 15^2) = 675\pi$$

$$S_{tr} = (S_1 + S_2 + S_3) \cdot \frac{l_{tr}}{\frac{u}{2}} \quad (66)$$

$$S_{tr} = \left( \frac{75}{2} \pi + 30\pi + 675\pi \right) \cdot \frac{1000}{\frac{3,5}{2}} = \mathbf{1\,332\,932,9\,mm^2} = \mathbf{1,333\,m^2}$$

### Výpočet počtu potřebných žebrovaných trubek

$$n'_{tr} = \frac{S'_{POV}}{S_{tr}} \quad (67)$$

$$n'_{tr} = \frac{39,404}{1,333} = \mathbf{29,56}$$

Volím  $n_{tr} = 32\text{ ks}$  trubek uspořádaných ve třech přesazených řadách.

### Skutečná plocha ohříváku vzduchu

$$S_{POV} = n_{tr} \cdot S_{tr} \quad (68)$$

$$S_{POV} = 32 \cdot 1,333 = \mathbf{42,656\,m^2}$$

## 8.7 Tlaková ztráta trubkového svazku

### Tlaková ztráta prouděním [2]

$$\Delta p_1 = \frac{c_e^2}{2} \cdot \rho_{stř,vz} \cdot \left( \frac{273,15+t_{stř,2}}{273,15+t_{st}} \right)^{0,583} \quad (69)$$

$$\rho_{stř,vz} = \frac{\rho_{vz,1} + \rho_{vz,2}}{2} = \frac{1,247 + 1,028}{2} = 1,138 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (70)$$

$$\Delta p_1 = \frac{14,137^2}{2} \cdot 1,138 \cdot \left( \frac{273,15+40}{273,15+95} \right)^{0,583} = \mathbf{103,480 \text{ Pa}}$$

$$\Delta p = n_{řad} \cdot \Delta p_1 \quad (71)$$

$$\Delta p = 3 \cdot 103 = \mathbf{310,4 \text{ Pa}}$$

### Tlaková ztráta místní

Pro žebrovaný svazek trubek s počtem řad  $n_{řad}$  se určí součinitel tlakové ztráty při kolmém směru proudění z rovnice (72) [2]. Konstanty  $K, k_1, k_2, k_3$  jsou určeny z literatury [2] Tab. 8. 6.

$$\Delta p_m = \zeta \cdot \frac{c_e^2}{2} \cdot \rho_{stř,vz} \quad (72)$$

$$\zeta = K \cdot n_{řad} \cdot \left( \frac{h}{d_2} \right)^{k_1} \cdot \left( \frac{u}{d_2} \right)^{-k_2} \cdot Re_{da}^{-k_3} \quad (73)$$

- $K = 2,0$
- $k_1 = 0$
- $k_2 = 0,72$
- $k_3 = 0,24$

$$\zeta = 2 \cdot 3 \cdot \left( \frac{0,015}{0,03} \right)^0 \cdot \left( \frac{0,0035}{0,03} \right)^{-0,72} \cdot 22\,158^{-0,24} = 2,553$$

$$\Delta p_m = 2,553 \cdot \frac{14,137^2}{2} \cdot 1,138 = 290,2 \text{ Pa}$$

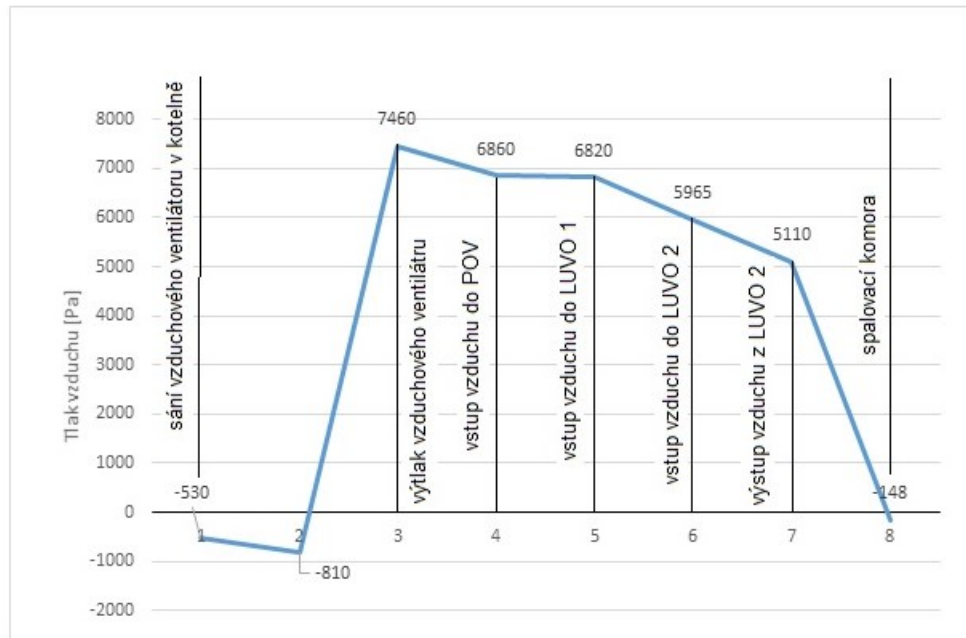
### Celková tlaková ztráta

$$\Delta p_c = \Delta p + \Delta p_m \quad (74)$$

$$\Delta p_c = 310,4 + 290,2 = \mathbf{600,6 \text{ Pa}}$$

## 9 Aerodynamický výpočet vzduchového traktu kotle

### 9.1 Průběh statického tlaku vzduchu se zařazením POV



Graf 1 Průběhu statického tlaku se zařazením POV

Průběh statického tlaku vzduchu ve vzduchovém traktu kotle s nově zařazeným parním ohřívákem vzduchu je na Graf 1.

### 9.2 Charakteristika ventilátoru

Tlaky  $p_2, p_3$  jsou tlaky z měření, které najdeme v Příloze B.

$$\Delta p_{vent} = p_2 + p_3 = 810 + 6\,860 = 7\,670 \text{ Pa}$$

$$p_{stř,vent} = p_{atm} + p_3 = 96\,920 + 6\,860 = 103\,480 \text{ Pa}$$

$$t_{stř,vent} = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Pro střední teplotu za ventilátorem  $t_{stř,vent} = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a střední tlak na ventilátoru  $p_{stř,vent} = 103\,480 \text{ Pa}$  jsem určit z programu EES  $\rho_{skut} = 1,177 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

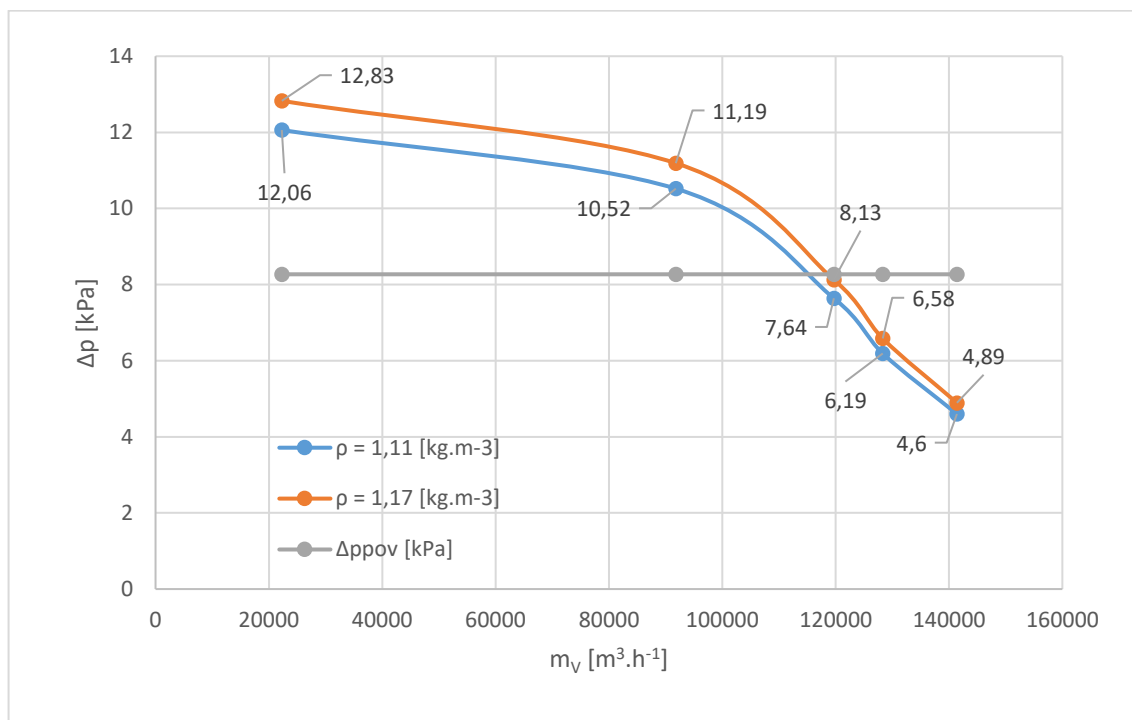
$$\dot{m}_{vz,s} = 28,77 \text{ m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1} = 103\,572 \text{ m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\Delta p_{vent,POV} = p_2 + p_3 + \Delta p_c = 810 + 6\,860 + 600 = 8\,270 \text{ Pa}$$

$$\dot{m}_{V,POV} = 118\,378 \, m_N^3 \cdot h^{-1}$$

$\dot{m}_V [m^3 \cdot h^{-1}]$	$\Delta p [kPa]$	$\Delta p_{vent} [kPa]$
22284	12,06	12,83
91799	10,52	11,19
119688	7,64	8,13
128311	6,19	6,58
141402	4,6	4,89
$\rho [kg \cdot m^{-3}]$	1,11	1,17

Tabulka 11 Charakteristika vzduchového ventilátoru



Graf 2 Charakteristika vzduchového ventilátoru

Z výše uvedeného grafu (Graf 2) charakteristiky vzduchového ventilátoru vyplývá, že stávající ventilátor vyhovuje i v případě zařazení parního ohříváku vzduchu do vzduchového traktu kotle. Potřebné množství vzduchu pro spalování je  $\dot{m}_{vz,s} = 28,77 \, m_N^3 \cdot s^{-1} = 103\,572 \, m_N^3 \cdot h^{-1}$ . Tlaková ztráta ventilátoru s instalací parního ohříváku vzduchu je  $\Delta p_{vent,POV} = 8\,270 \, Pa$ . Při této tlakové ztrátě je množství dodávaného vzduchu  $\dot{m}_{V,POV} = 118\,378 \, m_N^3 \cdot h^{-1}$ , což je pro námi navržený parní ohřívák vzduchu dostačující.



## 10 Jednoduché ekonomické zhodnocení

Poruchy na stávajícím vzduchovém ohřívačku LUVO 1 způsobují zvýšení tlakové ztráty kotle na straně spalín a tím snížení dosažitelného výkonu kotle. Tato skutečnost přináší zvýšení ekonomických nákladů na provoz kotle v podobě zvýšené spotřeby energie na provoz spalínového ventilátoru a rovněž ztráty v podobě nedosažení jmenovitého výkonu kotle.

Hutní energetika má možnost spalovat přebytky hutních plynů i na dalších kotlích v energetice, ale tento plyn již není zcela využit pro konečnou výrobu elektrické energie.

Další ztráty jsou způsobené nutností odstávek pro čištění kotle a odstávek pro opravu zkorodovaných a zanesených trubek ohřívačku vzduchu LUVO 1. V tomto případě je nutno veškerý přebytek hutních plynů spalovat na jiných zařízeních hutní energetiky. Náklady na výměnu ohřívačku vzduchu jsou již v hodnotě cca 1,5 až 2 mil. Kč.

Instalací parního ohřívačku vzduchu dojde k využití nízkopotenciální páry, která již nemůže být využita pro výrobu elektrické energie v protitlaké turbíně. Pára, která prošla turbínou má na výstupu z turbíny ještě k dispozici využití entalpického spádu včetně skupenského tepla vody, kterou v turbíně nelze využít. Zejména v letních měsících je tohoto nízkopotenciálního tepla v hutním provozu nadbytek.

Snížení účinnosti kotle vlivem vyšší odchozí teploty spalín se vyrovná s náklady na čištění ohřívačku vzduchu LUVO 1 a na častou výměnu trubek ohřívačku LUVO 1.

## 11 Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval předeheřevem spalovacího vzduchu u plynového kotle, pro který byl navržen parní ohřívák vzduchu za účelem zvýšení teploty vstupního vzduchu do regeneračních spalinových ohříváků vzduchu (LUVO 1, LUVO 2). Díky tomuto opatření se zvýší teplota na konci těchto ohříváků a udrží se nad rosným bodem spalín. To vyloučí nebo omezí nebezpečí vzniku nízkoteplotní koroze v zařízeních za kotlem.

Ze zadaných hodnot byly provedeny stechiometrické výpočty různých typů plyných paliv a stanoveno potřebné množství vzduchu, množství vzniklých spalín a množství přivedeného paliva do kotle. Následně bylo vypočteno výrobní teplo  $Q_{Výr} = 67,344 \text{ MW}$  a účinnost kotle  $\eta_k = 95,5 \%$ . K vypočtení účinnosti kotle bylo nutné stanovit tepelné ztráty kotle.

Pára, která bude přiváděna do parního ohříváku vzduchu má tlak  $p_o = 150 \text{ kPa}$  a teplotu  $t_o = 150 \text{ °C}$ . Z parního ohříváku vzduchu vystupuje kondenzát, který je odváděn do napájecí nádrže. Vzduch v parním ohříváku vzduchu je ohříván z teploty  $t_{vz,1} = 10 \text{ °C}$  na  $t_{vz,1} = 70 \text{ °C}$  a je umístěn mezi vzduchovým ventilátorem a spalinovým ohřívákem vzduchu. Z tepelné bilance předeheřevu vzduchu byl vypočítán výkon parního ohříváku vzduchu a potřebné množství páry  $\dot{m}_o = 0,989 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , které je potřeba přivést do parního ohříváku vzduchu.

Dále jsem vypracoval návrh parního ohříváku vzduchu. Pára proudí v žebrovaných trubkách jejichž činná plocha je  $S_{tr} = 1,333 \text{ m}^2$  na 1 m délky trubky. Vypočítaná potřebná plocha ohříváku vzduchu je  $S'_{POV} = 39,404 \text{ m}^2$ . Zvolil jsem počet trubek ohříváku vzduchu  $n_{tr} = 32 \text{ ks}$ . Trubky jsou v přesazeném uložení ve třech řadách. Skutečná plocha ohříváku vzduchu tedy je  $S_{POV} = 42,656 \text{ m}^2$ . Na konci diplomové práce jsem spočítal vzduchovou tlakovou ztrátu parního ohříváče vzduchu a stanovil, že výkon stávajícího vzduchového ventilátoru je dostačující i v případě zařazení parního ohříváče vzduchu do spalovacího zařízení kotle.

## 12 Použitá literatura

- [1] DLOUHÝ, T. Výpočet kotlů a spalinových výměníků. 3. vyd. Praha: ČVUT Praha, 2011, 212 s. ISBN 978-80-01-03757-7
- [2] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983, 858 s., 2 příl
- [3] RAJPUT, R.K. Thermal Engineering. 8. vyd. Laxmi Publications, 2010, 1679 s., ISBN 8131808041
- [4] BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [5] NEUBERGER, Pavel, Daniel ADAMOVSÝ a Radomír ADAMOVSÝ. Termomechanika. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007. ISBN isbn978-80-213-1634-8.
- [6] HORSLEY Paul, Steam Heating systems [online]. Velká Británie, nedatováno. [cit. 2014-05-24]. Dostupné na URL: <[http://www.coolinfo.co.uk/brines\\_steam/steam\\_heating/stm\\_heating.html](http://www.coolinfo.co.uk/brines_steam/steam_heating/stm_heating.html)>
- [7] ARMSTRON International. Heating and Cooling Coils [online]. USA, 2014. [cit. 2019-05-10]. Dostupné na URL: <http://www.armstronginternational.com/heat-cooling-coils>
- [8] GOODGELLOW, Howard D. Industrial Ventilation Design Guidebook. 1. vyd. Academic Press, 2001, 1519 s., ISBN 0080508642
- [9] LAIN Miloš. Zpětné získávání tepla ve větrání a klimatizaci [online]. Praha, 2006. [cit. 2019-05-10]. Dostupné na URL: <<http://www.tzb-info.cz/3648-zpetneziskavani-tepla-ve-ventrání-a-klimatizaci-i>>
- [10] BALKE – DÜRR. Air Preheaters [online]. Germany, nedatováno. [cit. 2019-05-10]. Dostupné na URL: <<http://www.balcke-duerr.com/products/regenerative-heatexchangers/air-preheaters/>>
- [11] KOLAT, Pavel. *Přenos tepla a hmoty*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1986.
- [12] BÖCKKH, Peter von. *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis*. 2. New York: Springer, 2006. ISBN 3-540-31432-6.

- [13]    Leinveber, J., Vávra, P.: Strojnické tabulky. Albra, Praha, 2003, 1. vydání,       865  
          str., ISBN 80-86490-74-2

## 13 Seznam obrázků

Obrázek 1-1 Rozdělení podle směru proudů [5].....	15
Obrázek 1-2 Uspořádání svazku.....	15
Obrázek 1-3 Princip parního ohříváku vzduchu [7].....	16
Obrázek 1-4 Deskový výměník s protiproudem [9].....	17
Obrázek 1-5 Typ Ljungström [10].....	18
Obrázek 2-1 Stávající schéma kotle.....	21
Obrázek 3-1 Sonda Landcom 200 .....	22
Obrázek 3-2 Zobrazovací jednotka sondy Landcom 200.....	23
Obrázek 3-3 Čidlo – detektor rosného bodu sondy s platinovými elektrodami.....	23
Obrázek 4-1 Schéma měřících míst.....	28
Obrázek 4-3 Rozmístění měřících bodů.....	29
Obrázek 4-2 Měřící místo statického tlaku .....	29
Obrázek 4-4 Měřící místo.....	30
Obrázek 4-5 Zkouška A .....	31
Obrázek 4-6 Zkouška B .....	32
Obrázek 4-7 Zkouška C .....	32
Obrázek 4-8 Zkouška D .....	33
Obrázek 8-1 Uložení trubek s přesazením .....	48

## 14 Seznam tabulek

Tabulka 1 Označení zkoušek na kotli .....	24
Tabulka 2 Výsledky měření rosného bodu spalín 1/2 .....	24
Tabulka 3 Výsledky měření rosného bodu spalín 2/2 .....	25
Tabulka 4 Provozní režimy kotle .....	31
Tabulka 5 Složení zemního plynu .....	35
Tabulka 6 Složení vysokopecního plynu .....	38
Tabulka 7 Složení koksáresnkého plynu .....	41
Tabulka 8 Fyzikální vlastnosti pro výpočet výrobního tepla páry .....	46
Tabulka 9 Fyzikální vlastnosti vstupních a výstupních parametrů páry a kondenzátu .....	46
Tabulka 10 Fyzikální vlastnosti určující teploty .....	51
Tabulka 11 Charakteristika vzduchového ventilátoru .....	56

## 15 Seznam příloh

**Příloha A** – Snímky obrazovek jednotlivých zkoušek z měření rosného bodu spalín na výstupu z kotle

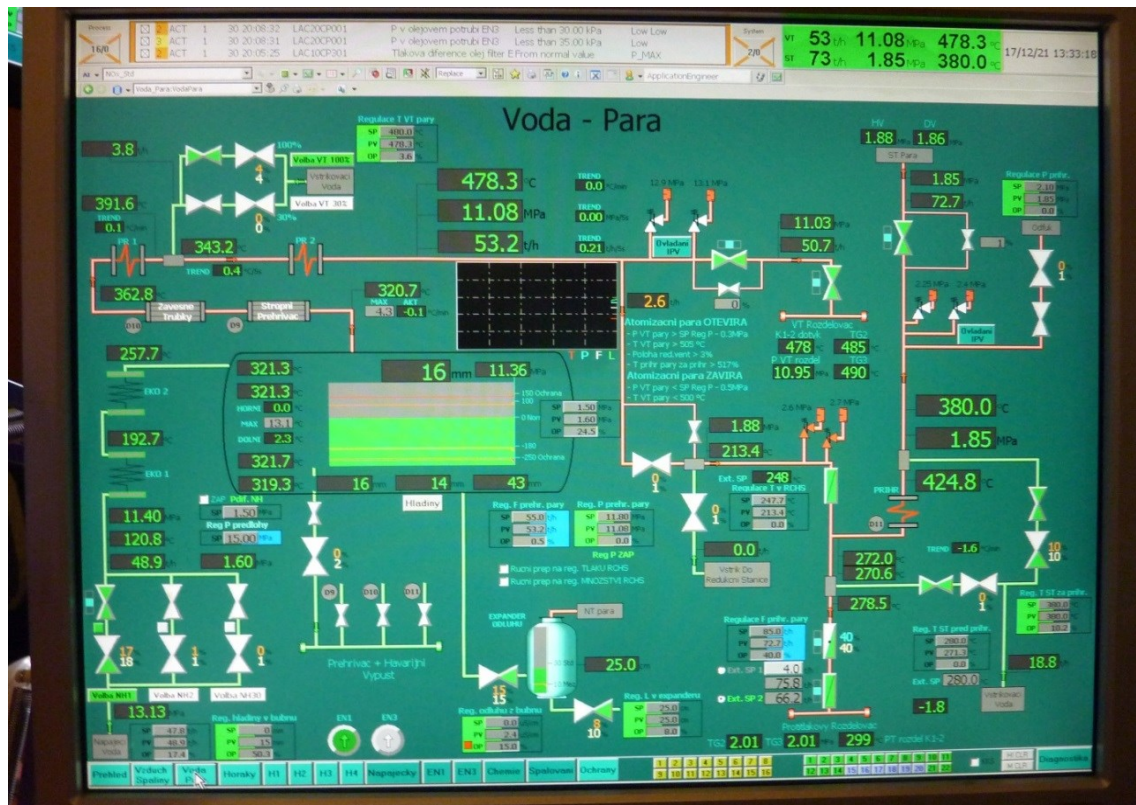
**Příloha B** – Měření vzduchového traktu kotle: Výsledky měření za tepla

**Příloha C** – Měření vzduchového traktu kotle: Výsledky měření za studena

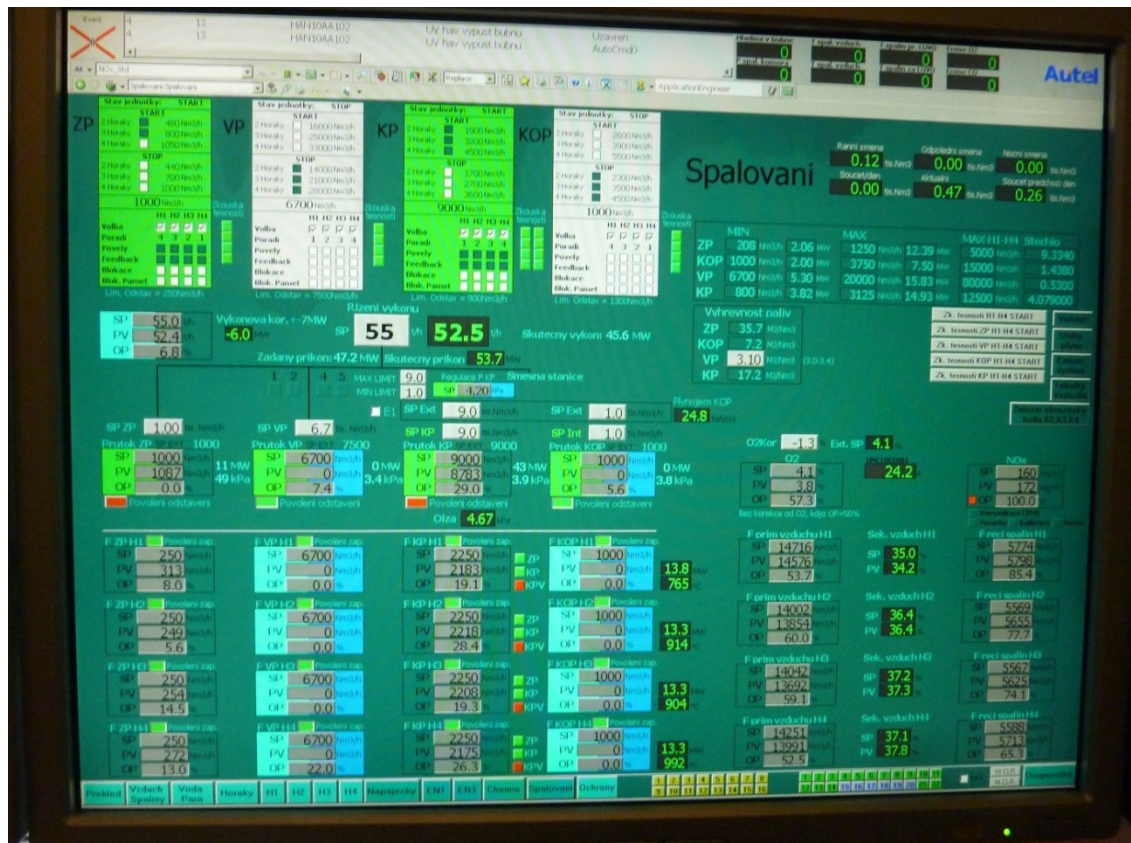
**Příloha D** – Schéma kotle s POV

**Příloha E** – Konstrukční výkres parního ohříváku vzduchu \_ CHM0052-V01

Příloha A

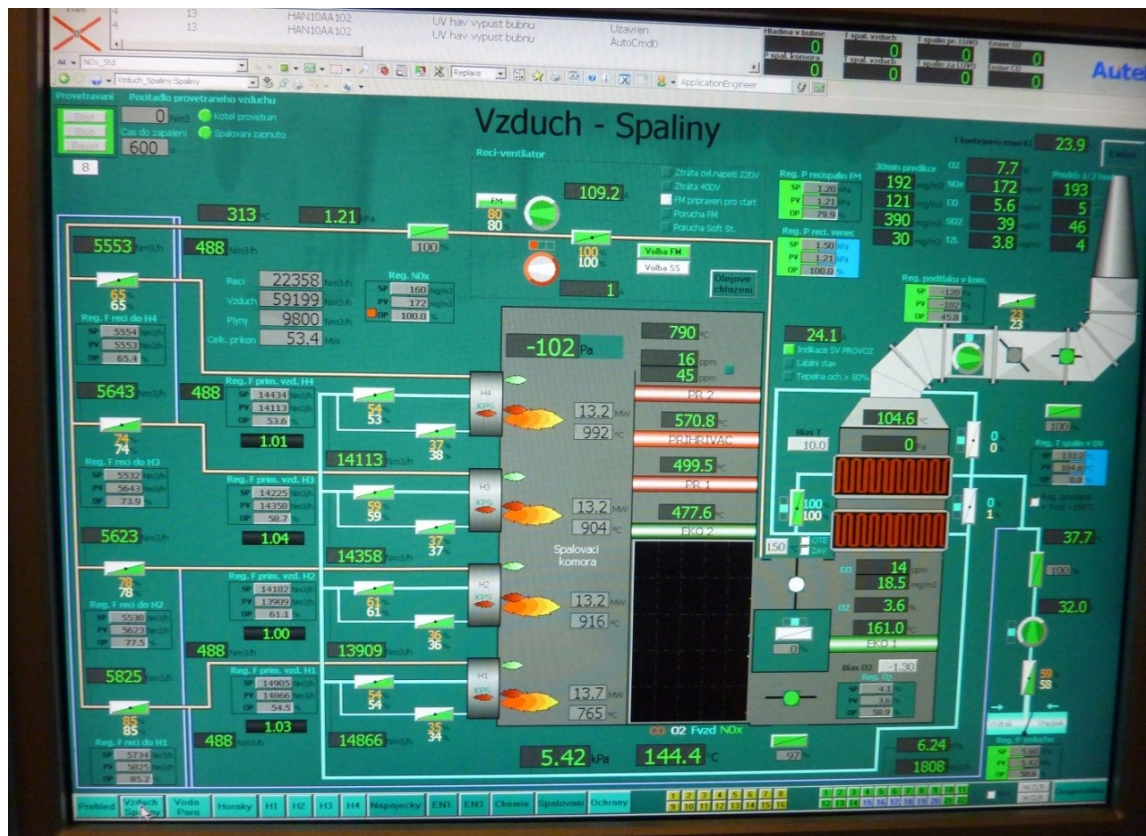


Zkouška č.1

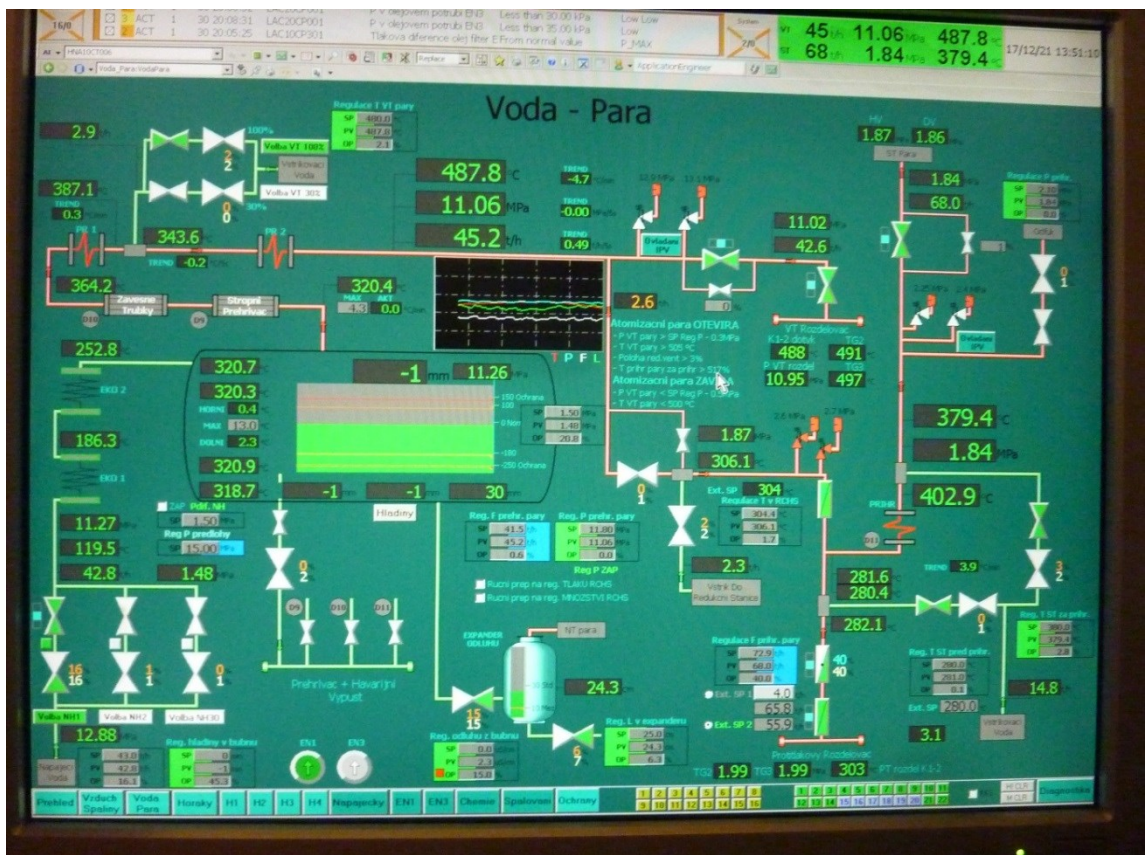


Zkouška č.1



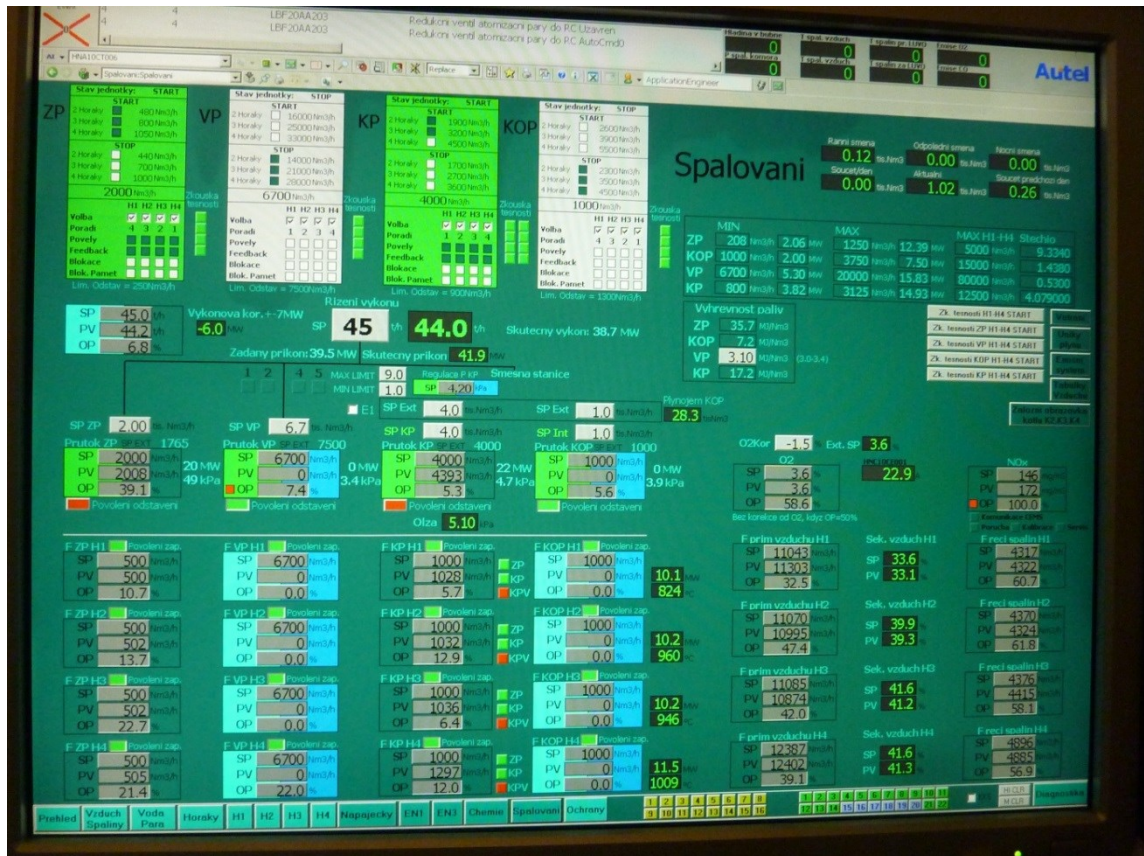


Zkouška č.1

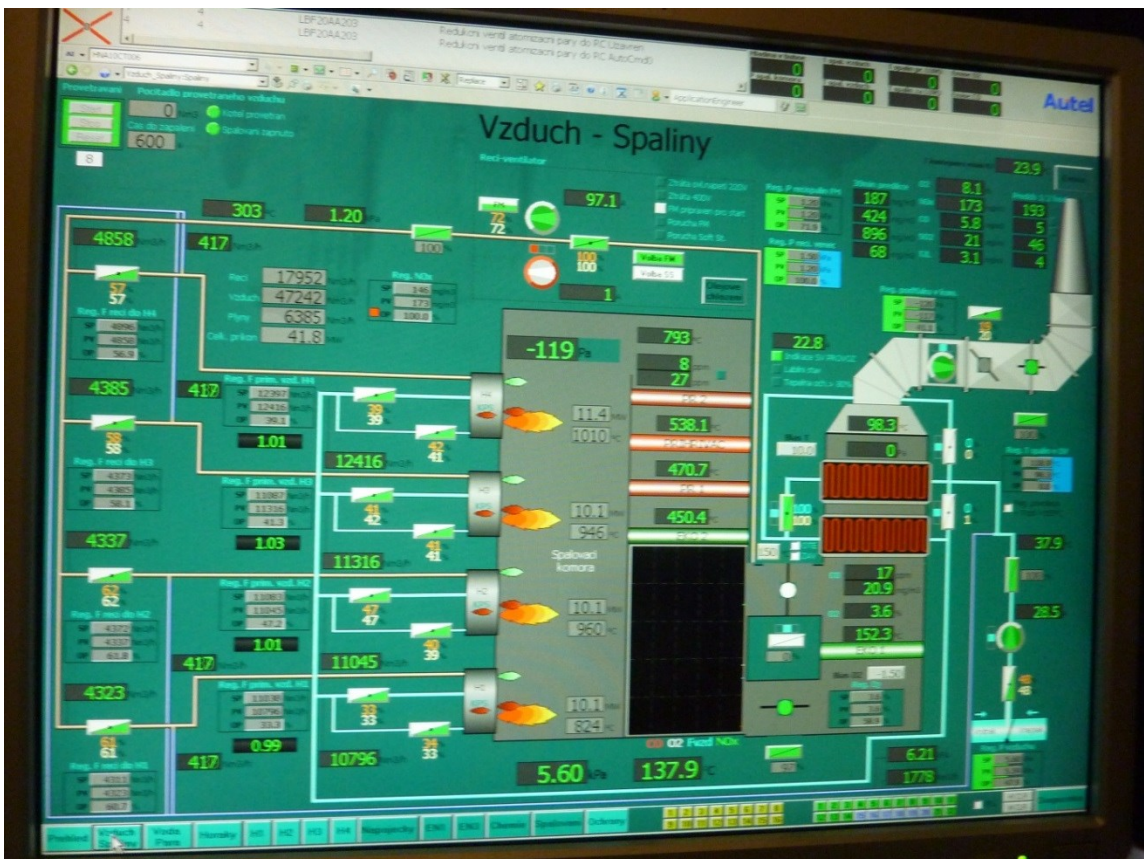


Zkouška č. 2a



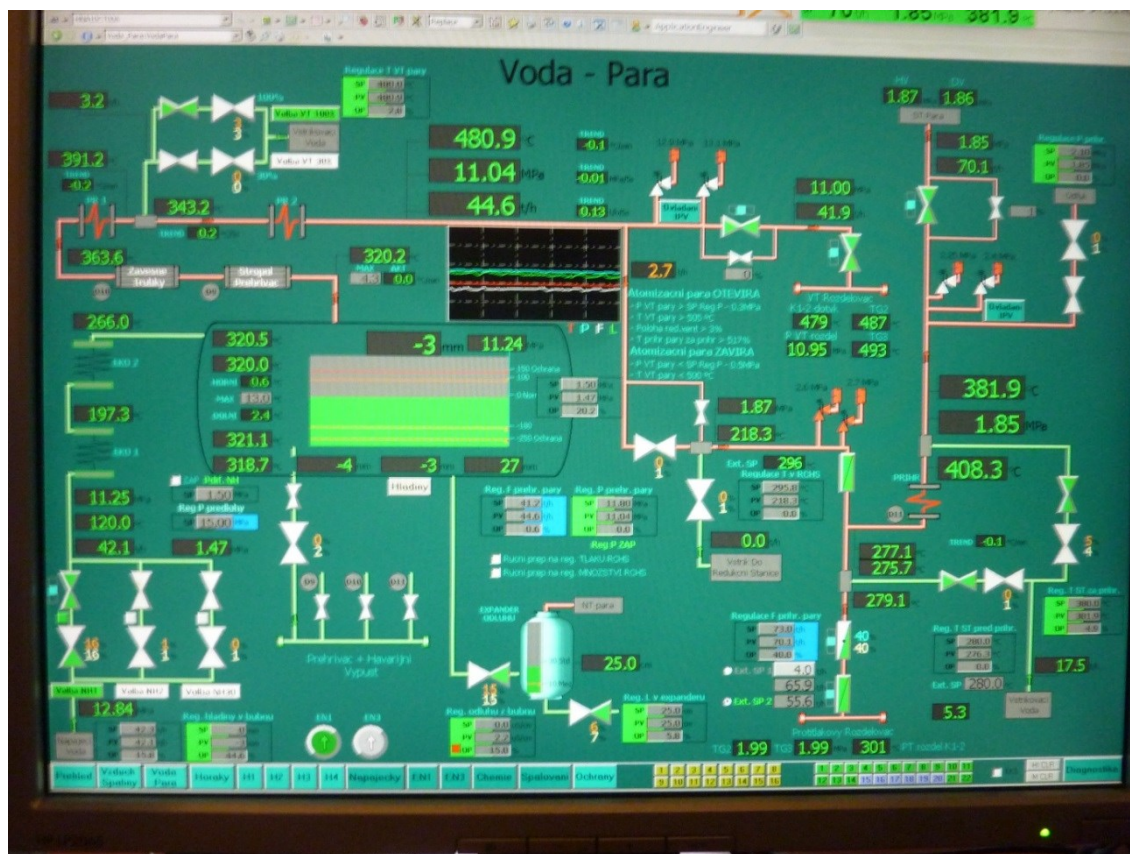


Zkouška č. 2a

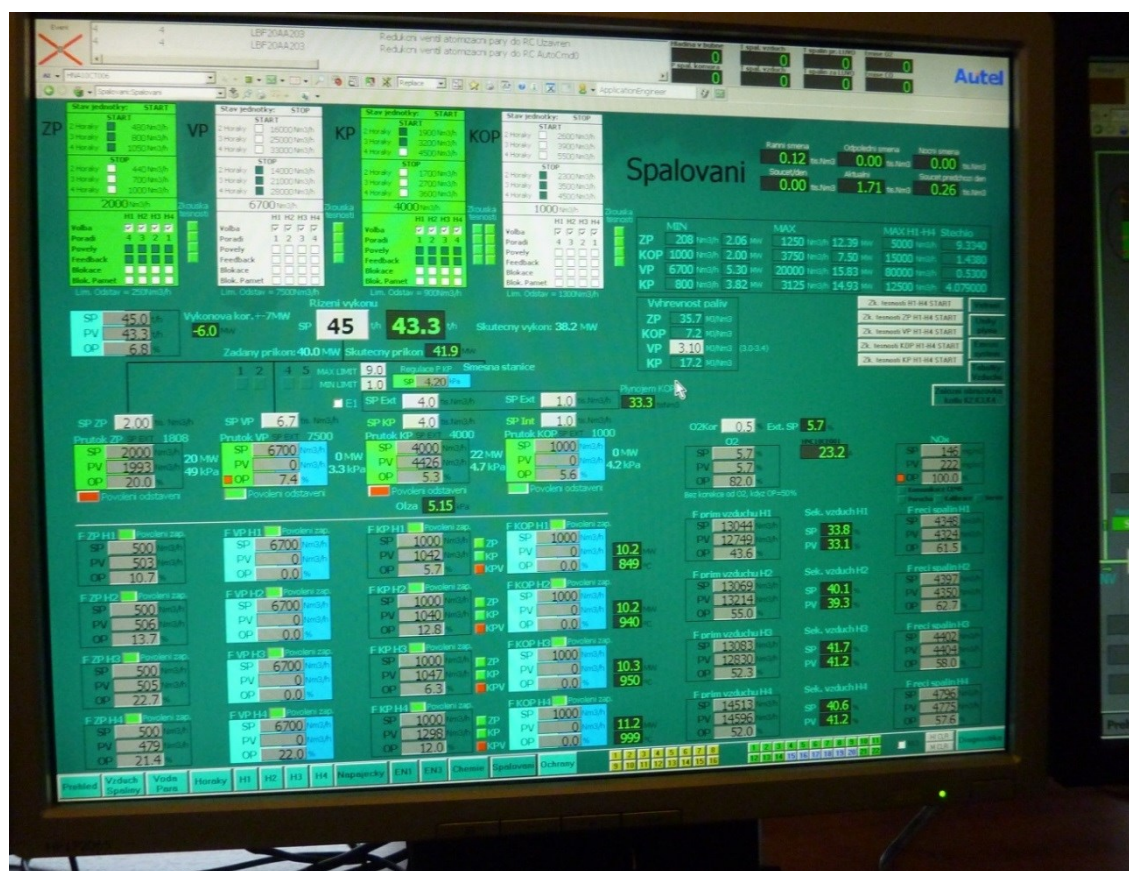


Zkouška č. 2a



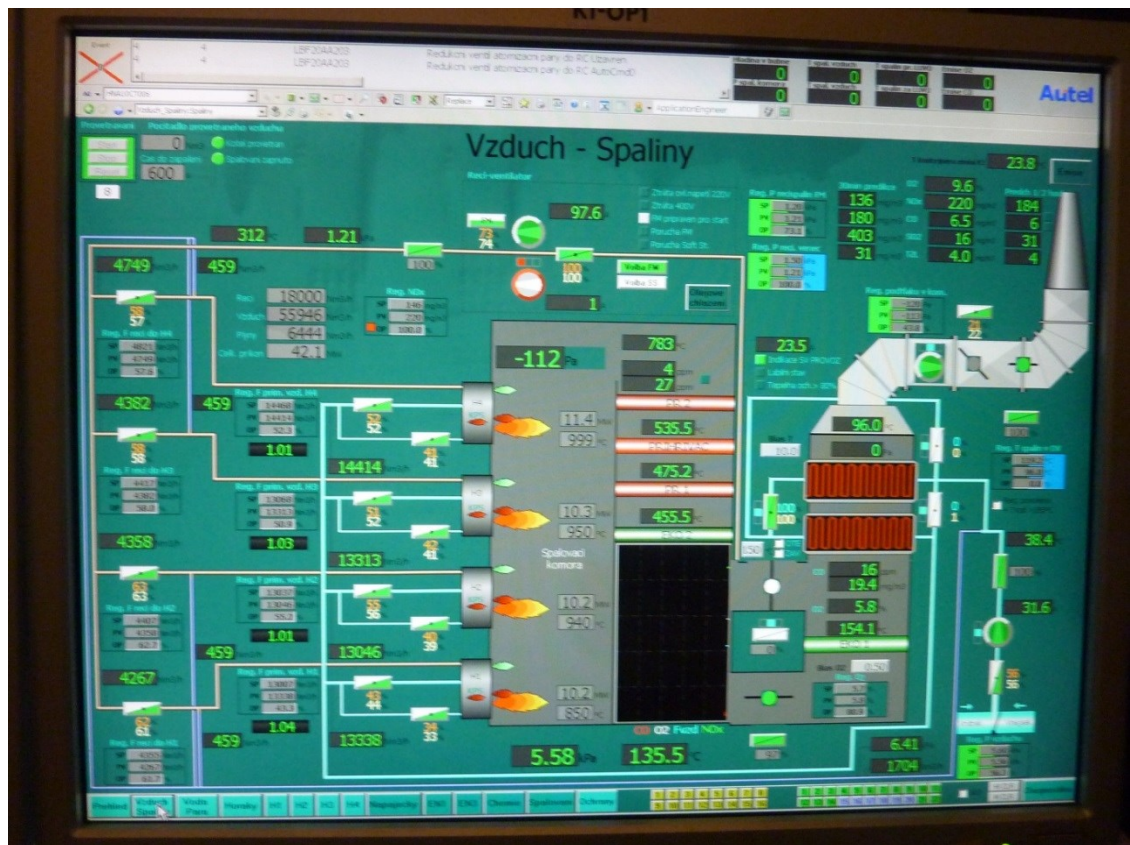


## Zkouška č. 2b

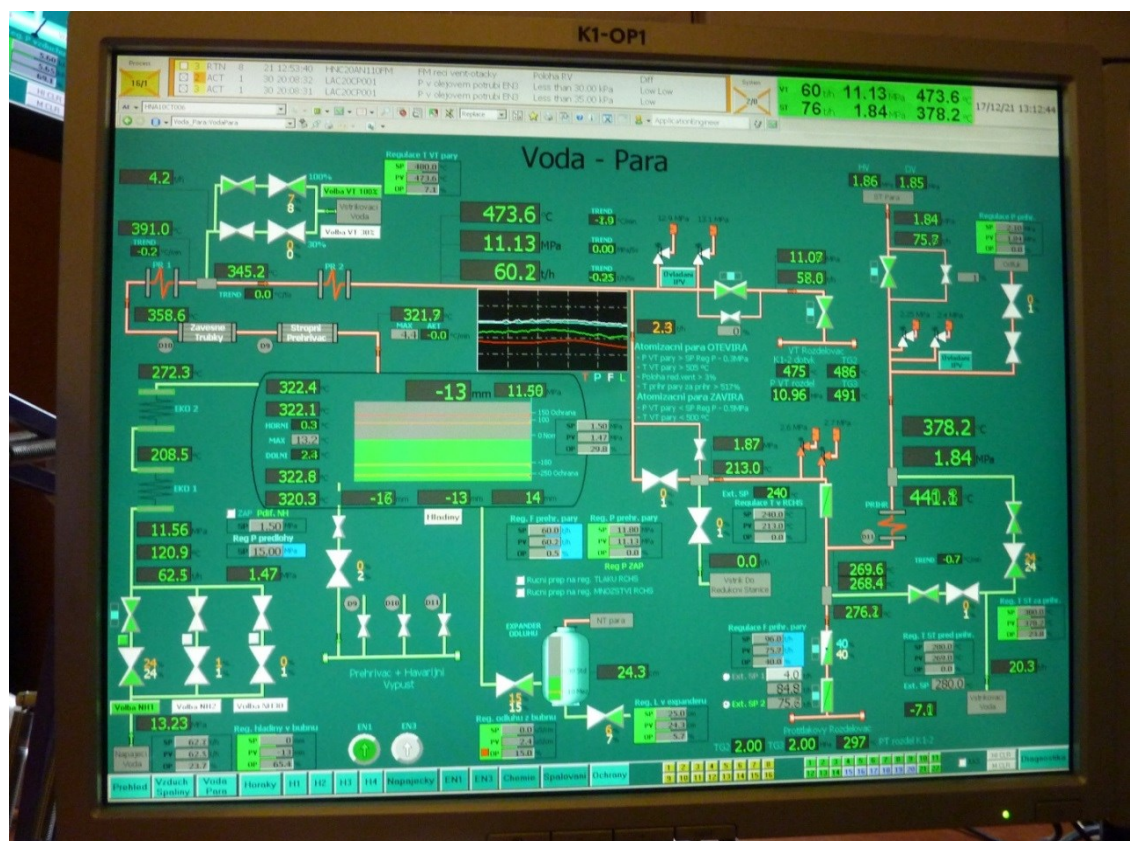


## Zkouška č. 2b



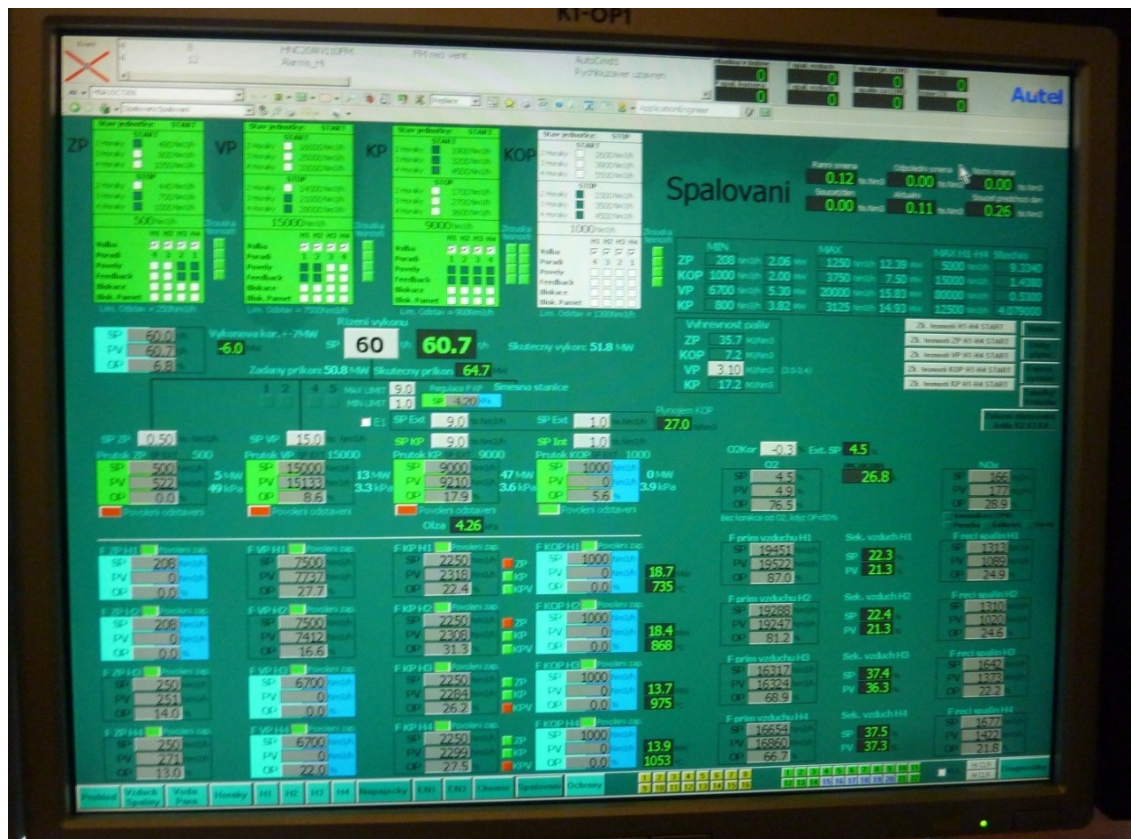


Zkouška č. 2b

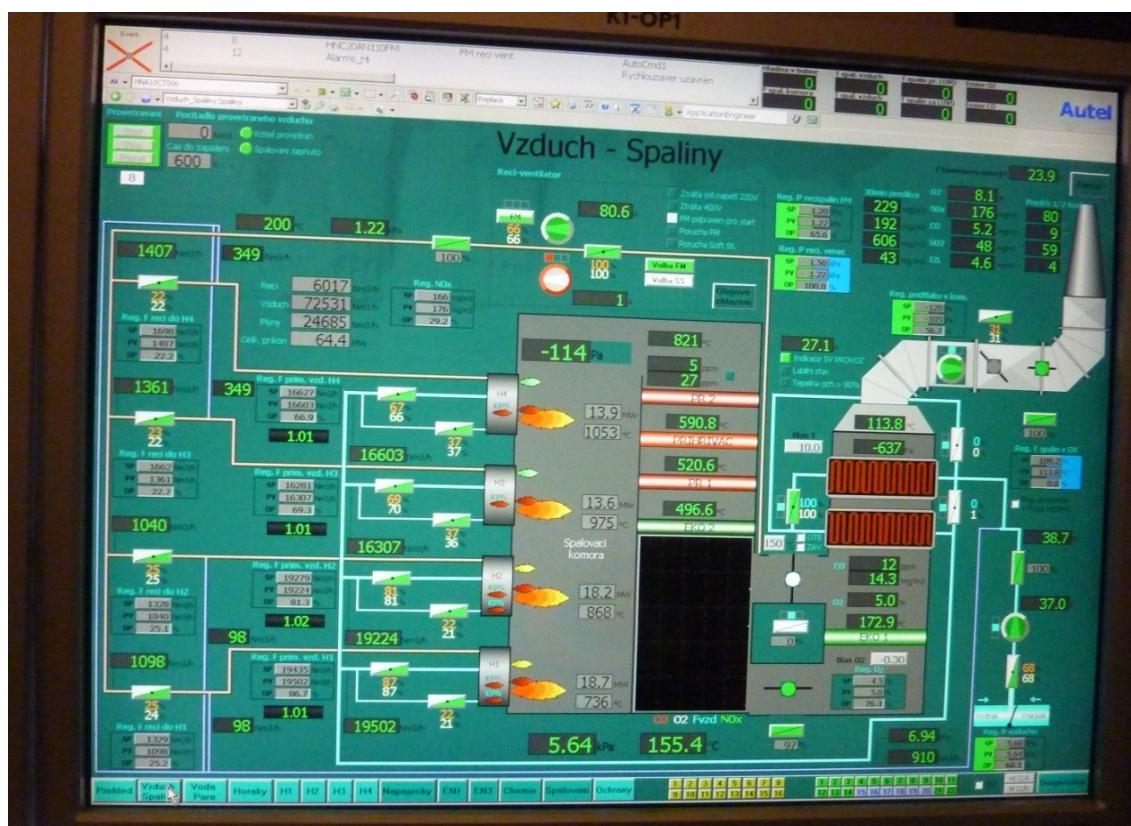


Zkouška č. 3



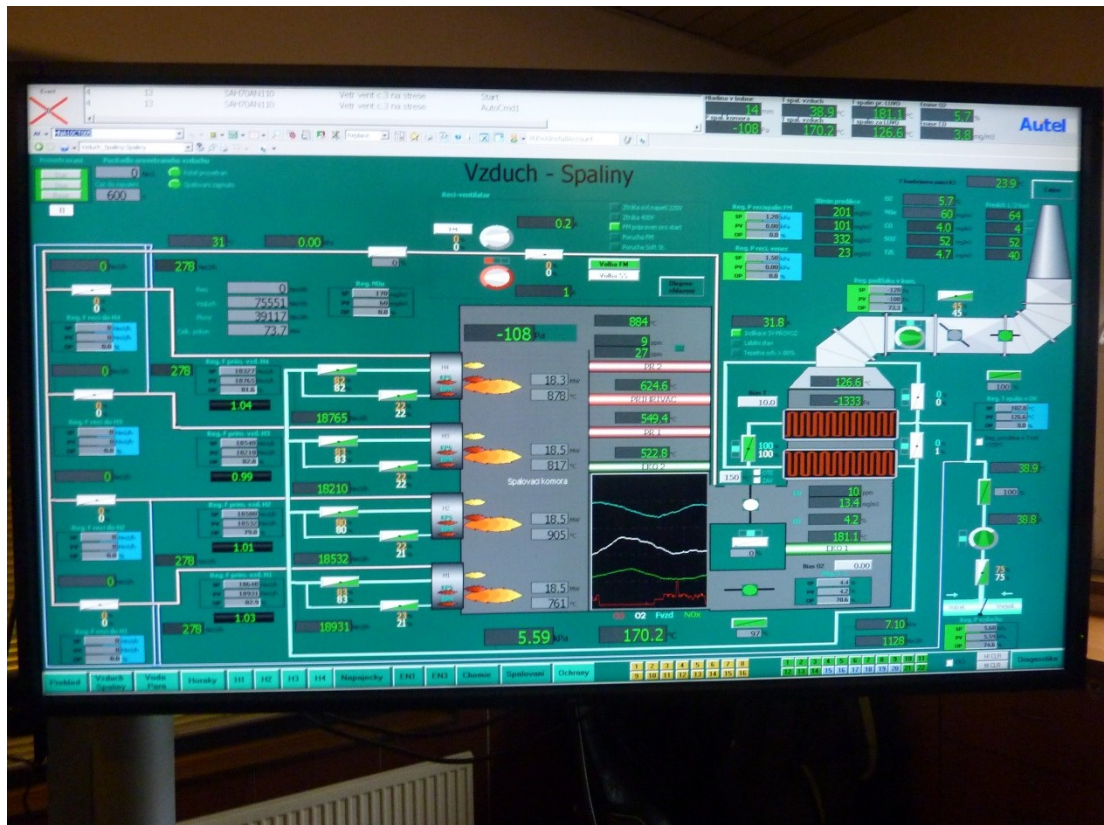


Zkouška č. 3

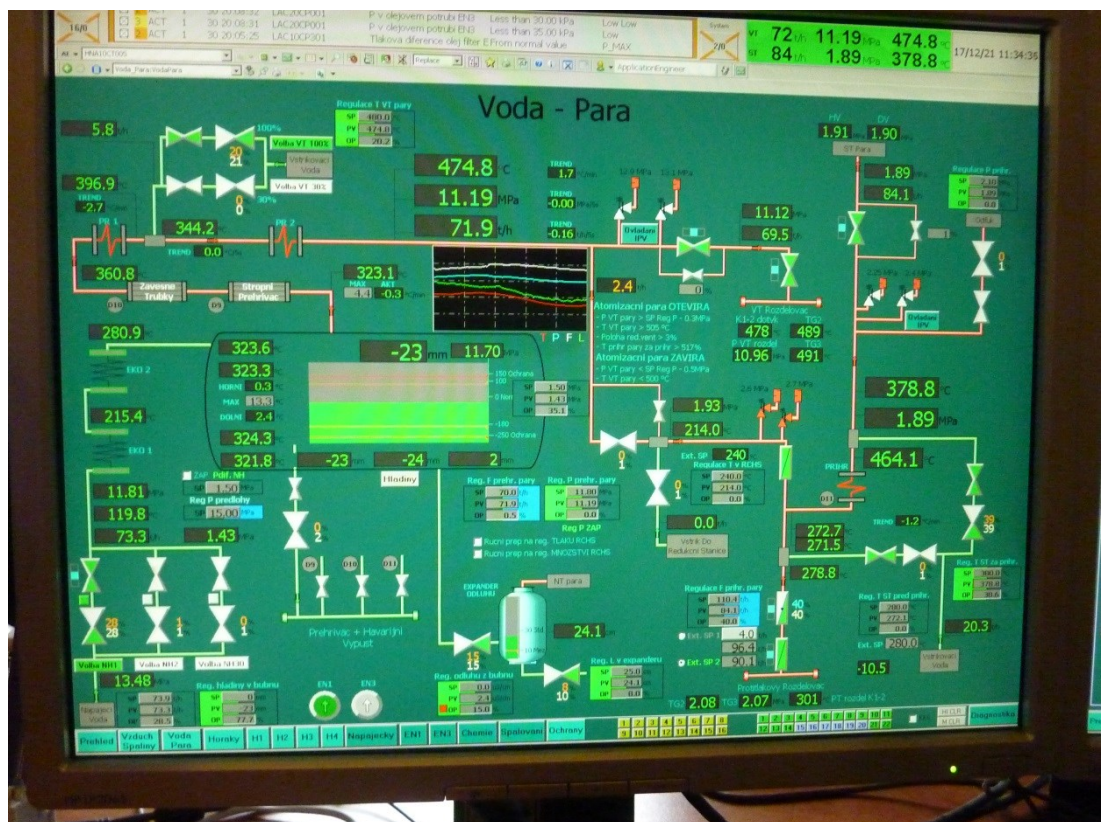


Zkouška č. 3



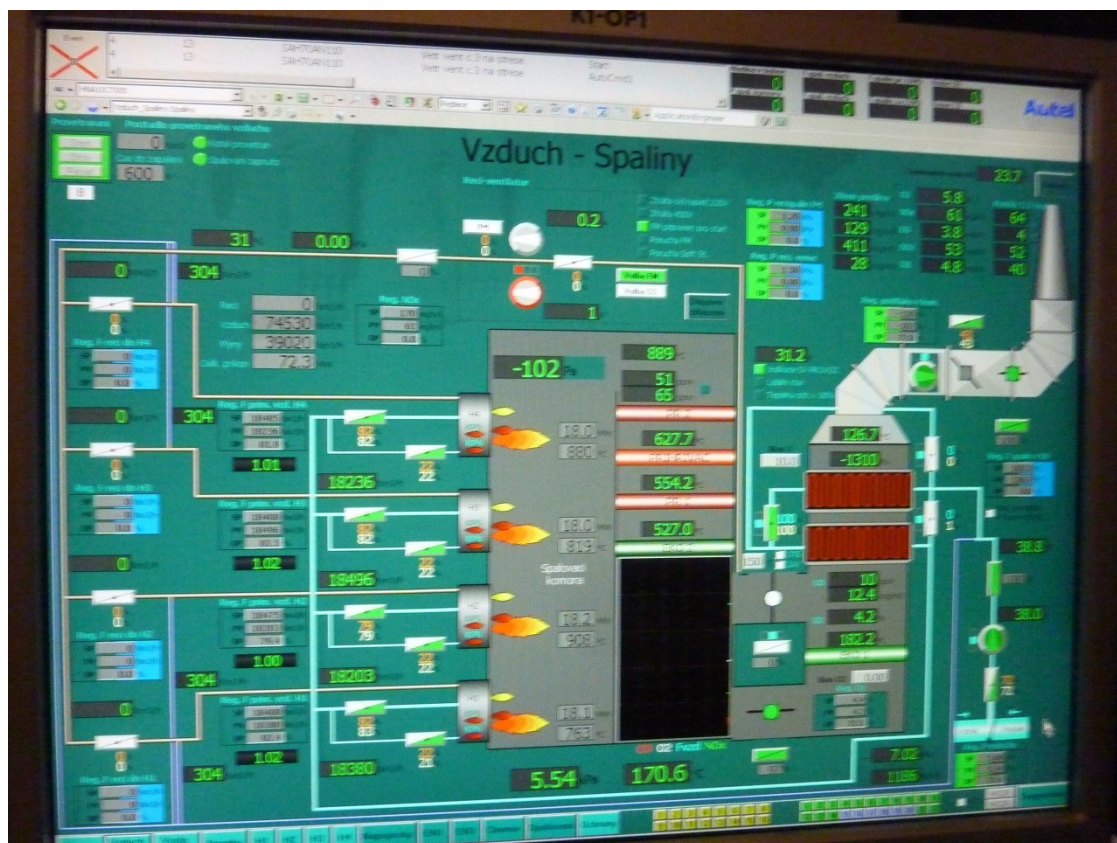


Zkouška č. 4

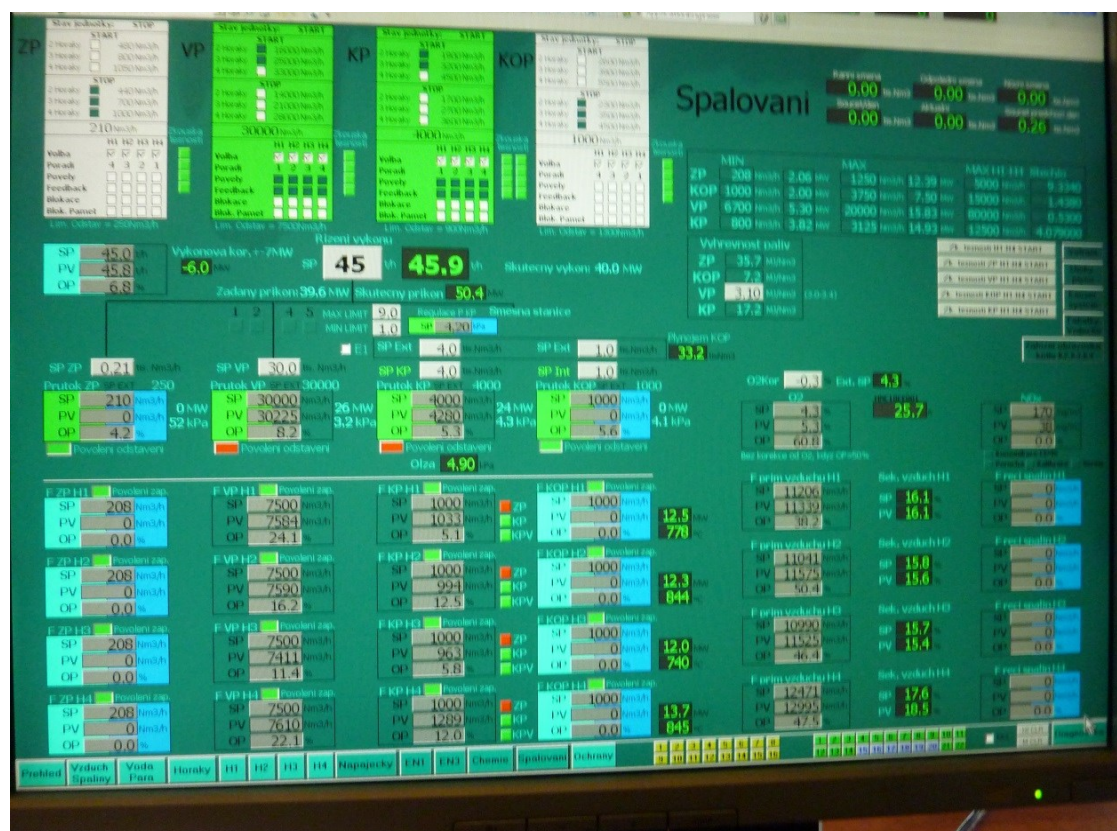


Zkouška č. 4



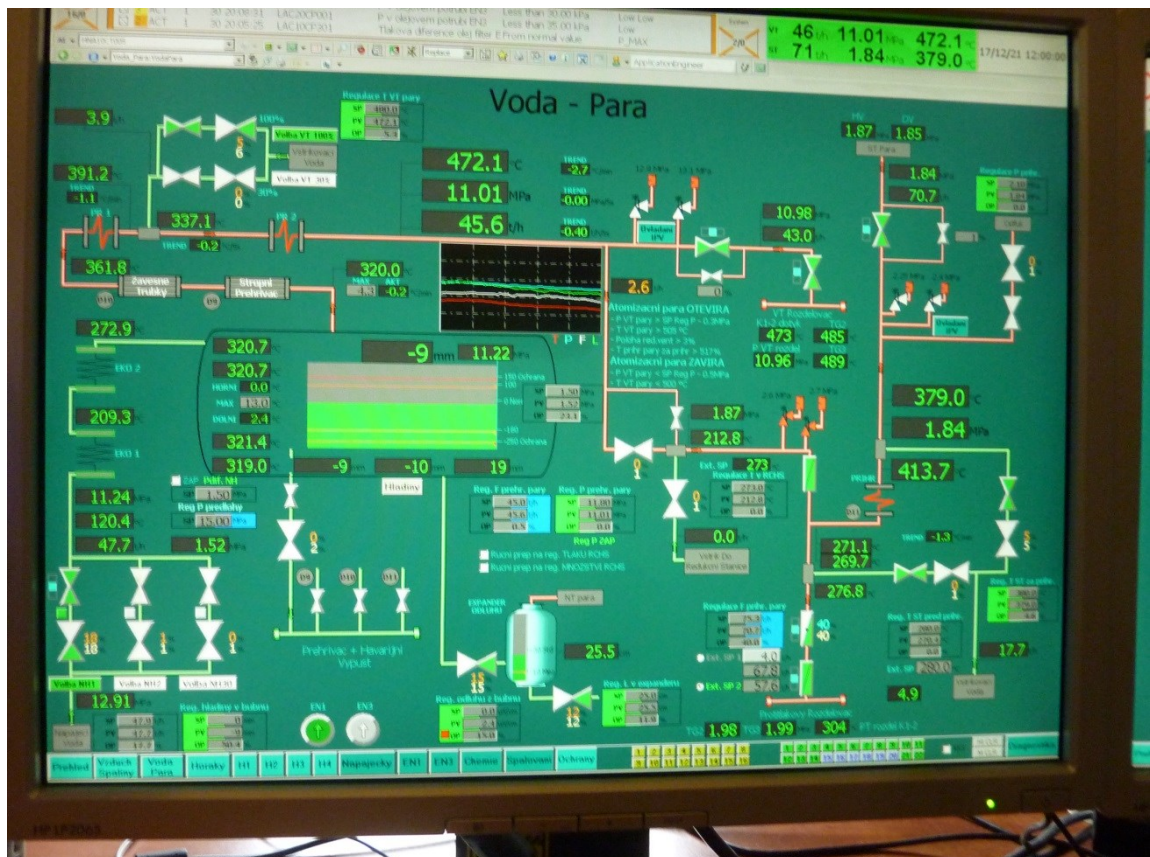


## Zkouška č. 4

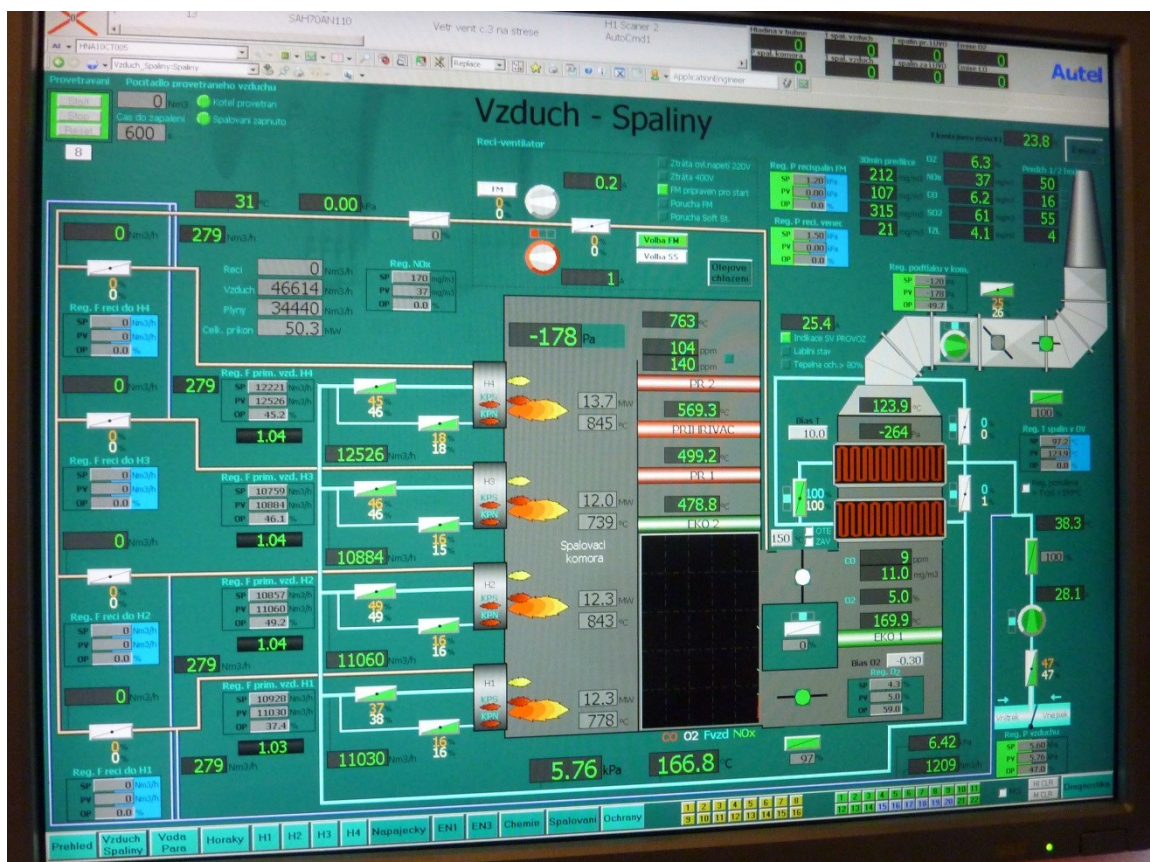


## Zkouška č. 5a



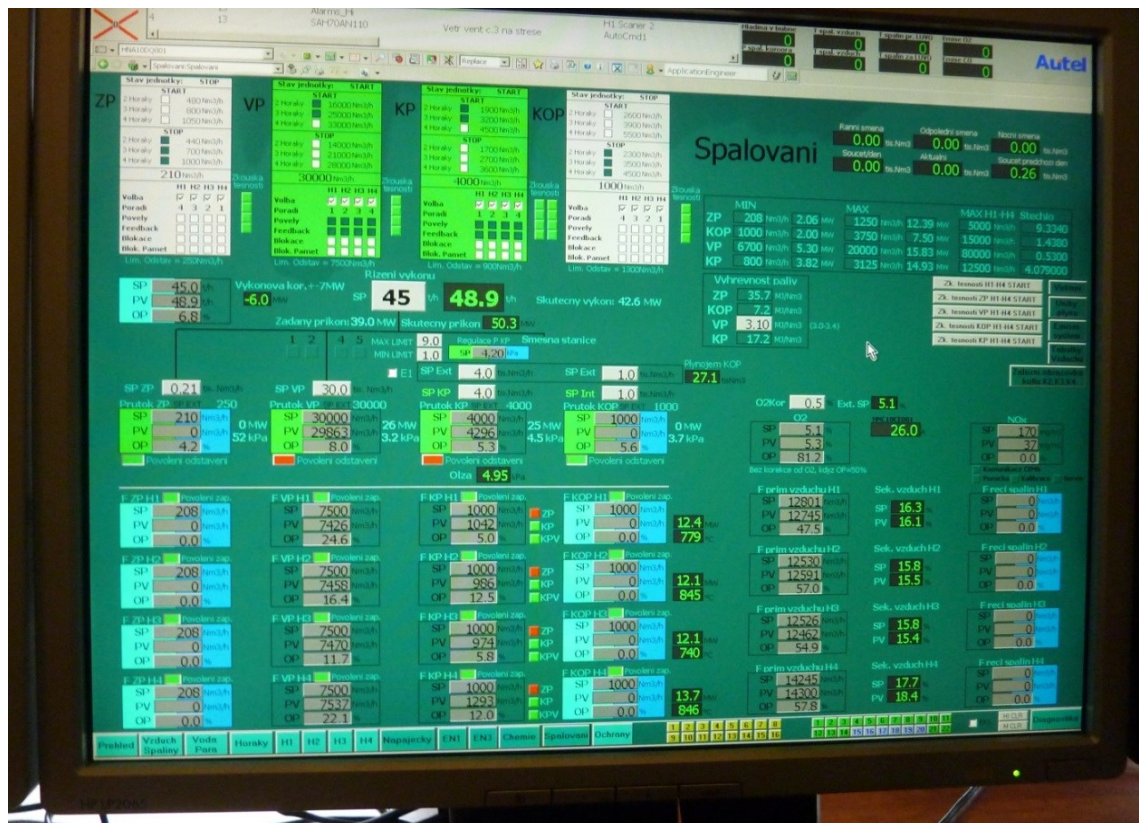


Zkouška č. 5a

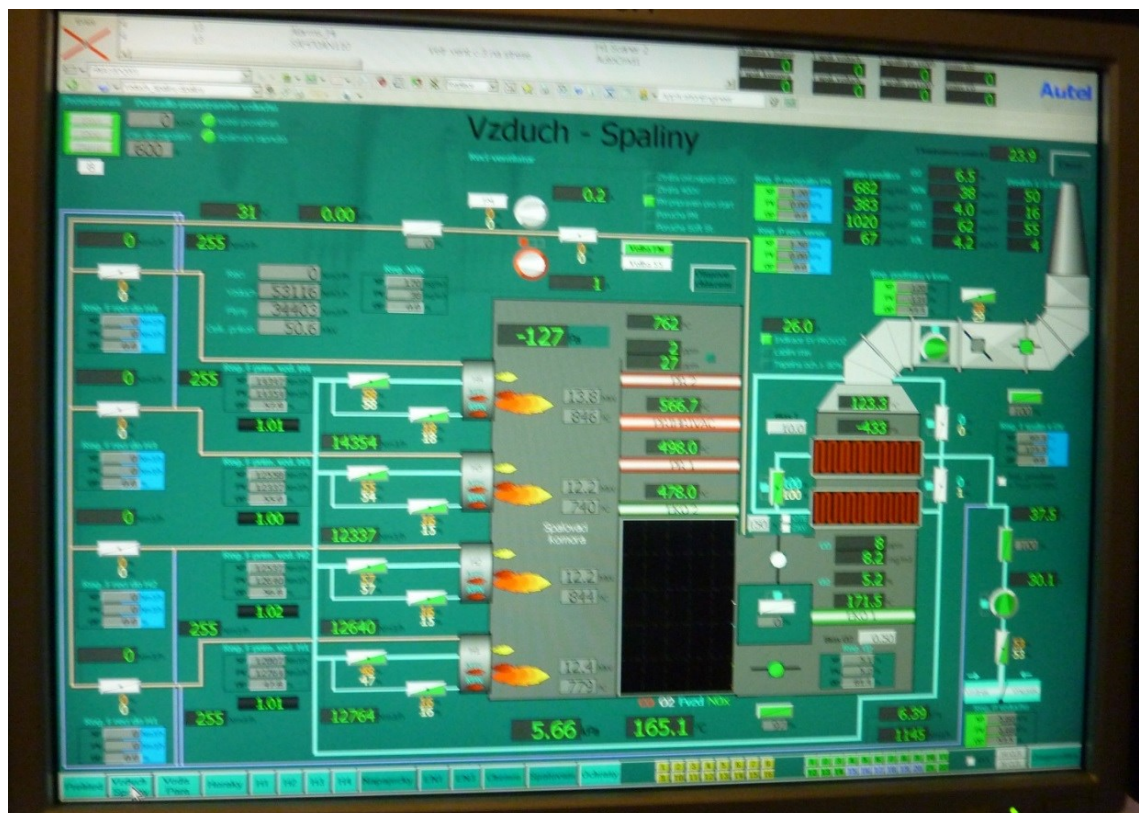


Zkouška č. 5a



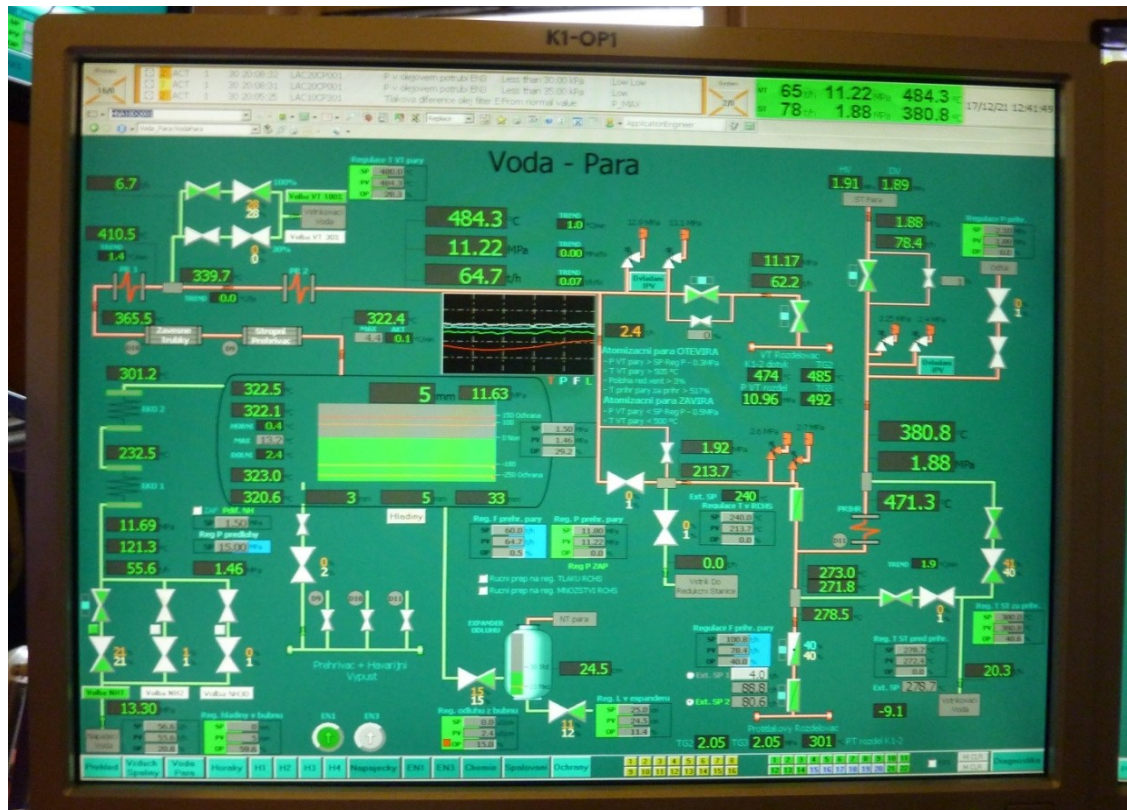


Zkouška č. 5b

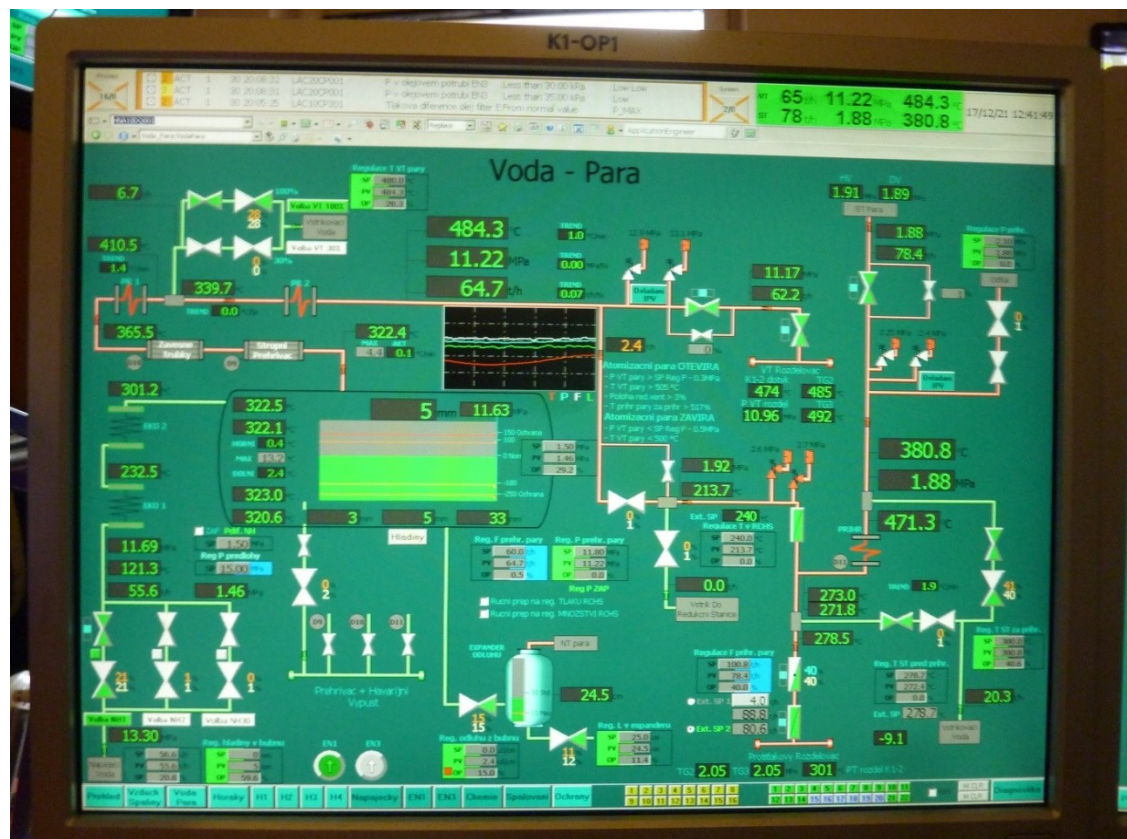


Zkouška č. 5b





Zkouška č. 5b



Zkouška č. 6





### Příloha B

Odběr	[-]	1.	2.	3.	Průměr
Teplota okolí	[°C]	23	23	23	23
Atmosférický tlak	[Pa]	97430	97430	97430	97430
Teplota vzduchu v měřicím místě	[°C]	31,00	31,00	31,00	31,00
Tlak vzduchu v měřicím místě	[Pa]	97040	97993	97035	97023
Hustota vzduchu v normálním stavu	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1,29	1,29	1,29	1,29
Hustota vzduchu v efektivním stavu	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1,11	1,11	1,11	1,11
Střední rychlost vzduchu	[m.s <sup>-1</sup> ]	14,65	15,42	15,24	15,10
Množství vzduchu	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	18,27	19,23	19,00	18,83
	[m <sub>n</sub> <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	15,71	16,53	16,34	16,19
	[m <sub>n</sub> <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> ]	56573	59501	58825	58299
	[kg. s <sup>-1</sup> ]	20,20	21,24	21,00	20,81

#### Naměřené a vypočtené hodnoty pro množství vzduchu Zkouška A

Odběr	[-]	1.	2.	3.	Průměr
Teplota okolí	[°C]	23	23	23	23
Atmosférický tlak	[Pa]	97430	97430	97430	97430
Teplota vzduchu v měřicím místě	[°C]	31,00	31,00	31,00	31,00
Tlak vzduchu v měřicím místě	[Pa]	96780	96780	96780	96780
Hustota vzduchu v normálním stavu	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1,29	1,29	1,29	1,29
Hustota vzduchu v efektivním stavu	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1,10	1,10	1,10	1,10
Střední rychlost vzduchu	[m.s <sup>-1</sup> ]	19,60	19,70	19,71	19,67
Množství vzduchu	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	24,43	24,56	24,57	24,52
	[m <sub>n</sub> <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	20,96	21,07	21,08	21,04
	[m <sub>n</sub> <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> ]	75451	75848	75888	75729
	[kg. s <sup>-1</sup> ]	26,94	27,08	27,09	27,03

#### Naměřené a vypočtené hodnoty pro množství vzduchu Zkouška B

Odběr	[-]	1.	2.	3.	Průměr
Teplota okolí	[°C]	23	23	23	23
Atmosférický tlak	[Pa]	97430	97430	97430	97430
Teplota vzduchu v měřicím místě	[°C]	31,00	31,00	32,00	31,33
Tlak vzduchu v měřicím místě	[Pa]	96620	96620	96620	96620
Hustota vzduchu v normálním stavu	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1,29	1,29	1,29	1,29
Hustota vzduchu v efektivním stavu	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1,10	1,10	1,10	1,10
Střední rychlost vzduchu	[m.s <sup>-1</sup> ]	22,23	22,32	22,08	22,21
Množství vzduchu	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	27,72	27,83	27,53	27,69
	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	23,74	23,83	23,58	23,72
	[m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> ]	85473	85796	84877	85382
	[kg. s <sup>-1</sup> ]	30,51	30,63	30,30	30,48

**Naměřené a vypočtené hodnoty pro množství vzduchu Zkouška C**

Odběr	[-]	1.	2.	3.	Průměr
Teplota okolí	[°C]	23	23	23	23
Atmosférický tlak	[Pa]	97430	97430	97430	97430
Teplota vzduchu v měřicím místě	[°C]	32,00	32,00	32,00	32,00
Tlak vzduchu v měřicím místě	[Pa]	96620	96620	96620	96620
Hustota vzduchu v normálním stavu	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1,29	1,29	1,29	1,29
Hustota vzduchu v efektivním stavu	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1,10	1,10	1,10	1,10
Střední rychlost vzduchu	[m.s <sup>-1</sup> ]	24,91	25,21	25,13	25,08
Množství vzduchu	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	31,07	31,43	31,33	31,28
	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	26,52	26,83	26,74	26,70
	[m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> ]	95460	96579	96272	96104
	[kg. s <sup>-1</sup> ]	34,08	34,48	34,37	34,31

**Naměřené a vypočtené hodnoty pro množství vzduchu Zkouška D**

Měřicí místo			Zkouška A	Zkouška B	Zkouška C	Zkouška D
Naměřený průtok vzduchu provozní údaje	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>		47046	61036	70530	80921
Naměřený průtok vzduchu	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>		58299	75729	85382	96104
Sání vzduchu v kotelně	Pa	27 m	-245	-320	-405	-530
Výtlač vzduchového ventilátoru	kPa	7 m	6,3	6,66	6,95	6,86
Vstup vzduchu do LUVO 1	kPa	15 m	6,29	6,59	6,91	6,82
Výtlač LUVO 2	kPa		5,56	5,55	5,58	5,11
Podtlak ve spalovací komoře	Pa	7 m	-98	-131	-107	-148

#### Naměřené hodnoty statického tlaku

Název	Jednotka	Zkouška A	Zkouška B	Zkouška C	Zkouška D
Podtlak ve spalovací komoře	Pa	-98	-131	-107	-148
Množství vzduchu	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	47262	60699	71957	80938
Množství plynu do kotle	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	34039	36830	38760	38696
Příkon v plynu	MW	48,5	61,6	71,7	70,6
Otevření klapky v sání VV	%	50	62	74	100
Ampérické zatížení VV	A	28	32,8	37,3	40,7
Teplota vzduchu ve výtlaču VV	°C	42,3	42	42,2	43
Tlak vzduchu za LUVO 2	kPa	5,5	5,5	5,58	5,11
Teplota vzduchu za LUVO 2	°C	173,5	186,5	190	189,7
Množství chladicího vzduchu	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	1266	1252	1382	1257
Tlak chladicího vzduchu	kPa	6,28	6,58	7,11	6,98

#### Údaje z provozních měřicích přístrojů a obrazovek operátora

	VT pára			Napájecí voda				ST pára					
	VT výkon (t/h)	Tlak VT	Teplota VT	Tlak před napájecí hlavou	Tlak za napájecí hlavou	Teplota před napáječkou	Teplota za napájecí hlavou	Množství ST	Tlak ST	Teplota ST	Množství nástřiku ST	Tlak nástřiku ST	Teplota nástřiku ST
Průměr za zkoušku A	44,06	11,07	480,41	12,92	11,28	118,49	122,93	66,23	1,83	380,07	10,71	3,64	118,49
Průměr za zkoušku B	58,65	11,15	483,21	13,23	11,56	119,26	123,39	75,84	1,89	380,24	12,34	3,64	119,26
Průměr za zkoušku C	63,95	11,17	480,97	13,38	11,67	119,30	123,84	74,78	1,89	380,13	13,30	3,63	119,30
Průměr za zkoušku D	63,80	11,17	480,79	13,34	11,67	117,45	121,63	73,50	1,89	380,11	13,45	3,62	117,45

#### Údaje provozních měřicích přístrojů, průměrné hodnoty 1/2

	Protitlaká pára			Plyny		Vzduch		
	Množství protitlaké páry (výpočet)	Tlak protitlaké páry	Teplota protitlaké páry	Množství VPP (m3)	Množství KP (m3)	Vzduch na 4 hořáky	Chladicí vzduch	Vzduch celkem z ventilátoru (výpočet)
Průměr za zkoušku A	55,52	1,97	279,57	29953,87	4770,21	45661,72	1287,12	46948,84
Průměr za zkoušku B	63,50	2,05	279,81	30132,88	7736,55	59774,00	1344,76	61118,76
Průměr za zkoušku C	61,49	2,05	283,38	29870,13	9372,82	69149,09	1381,37	70530,45
Průměr za zkoušku D	60,04	2,04	284,05	30170,54	9354,88	79639,36	1281,89	80921,24

Údaje provozních měřicích přístrojů, průměrné hodnoty 2/2

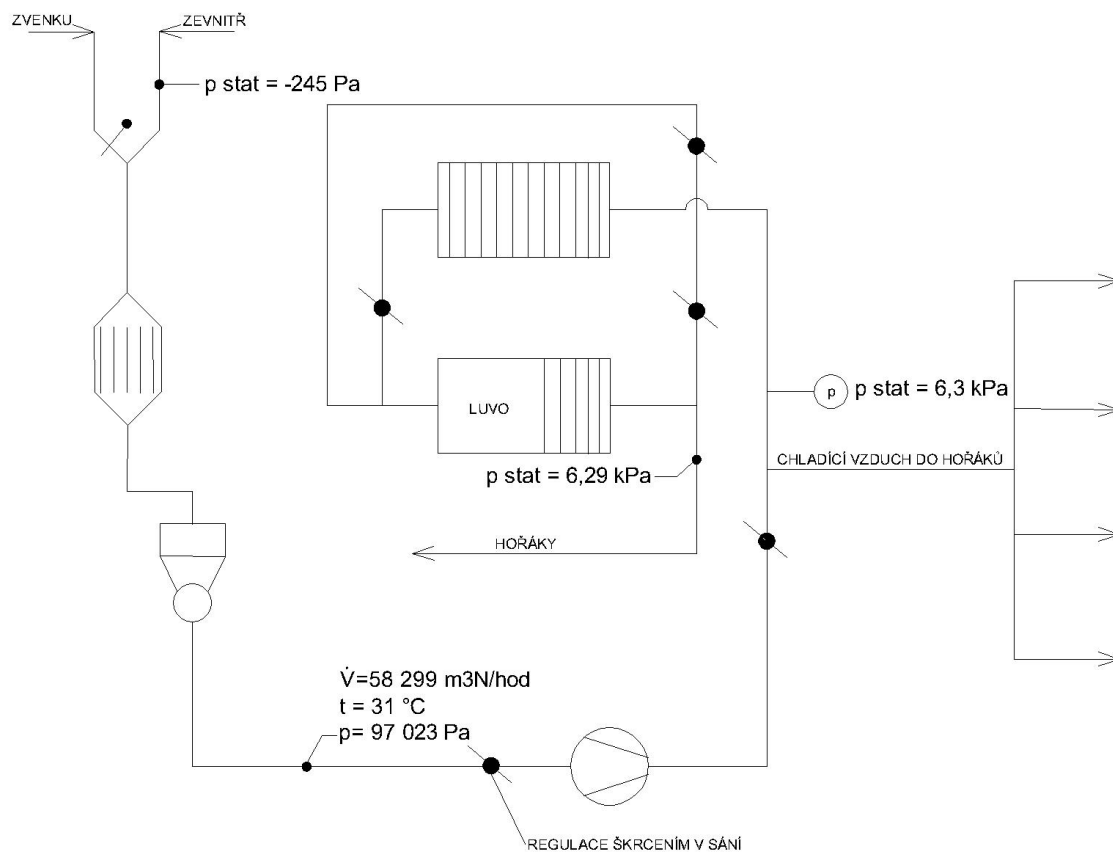
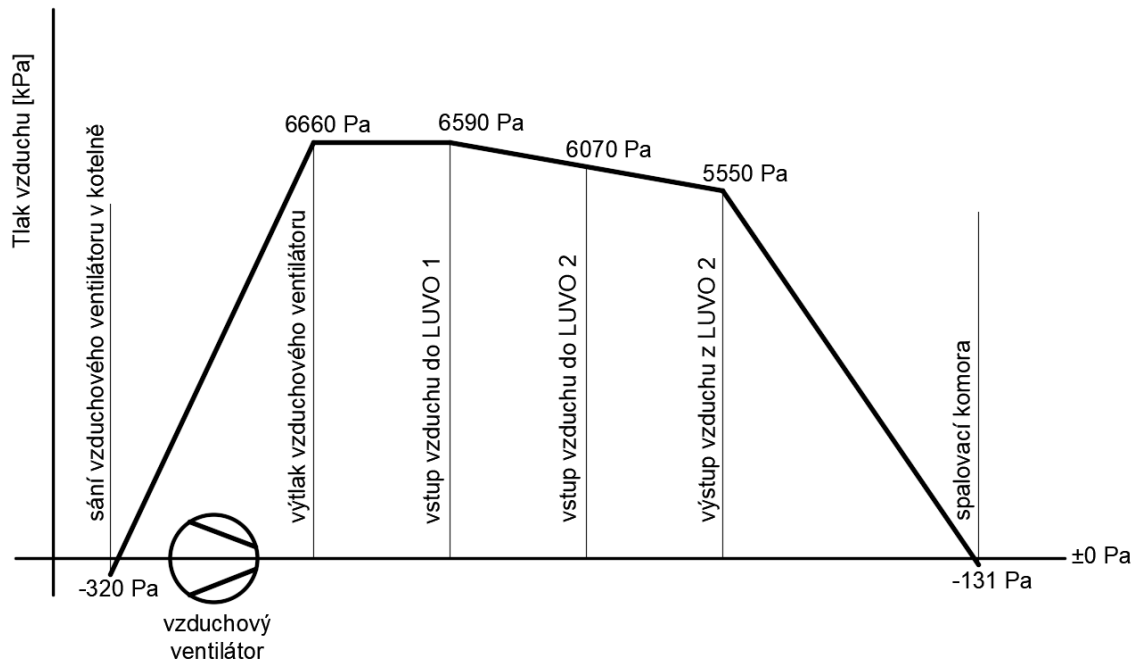


Schéma vzduchového traktu kotle s naměřenými hodnotami – Zkouška A

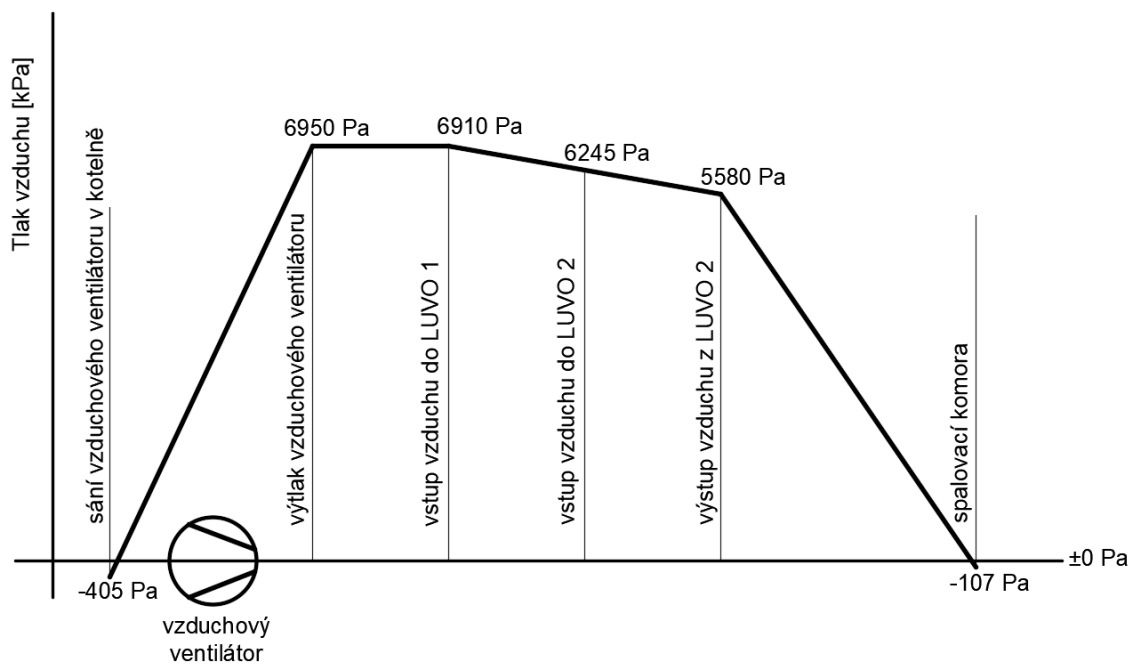




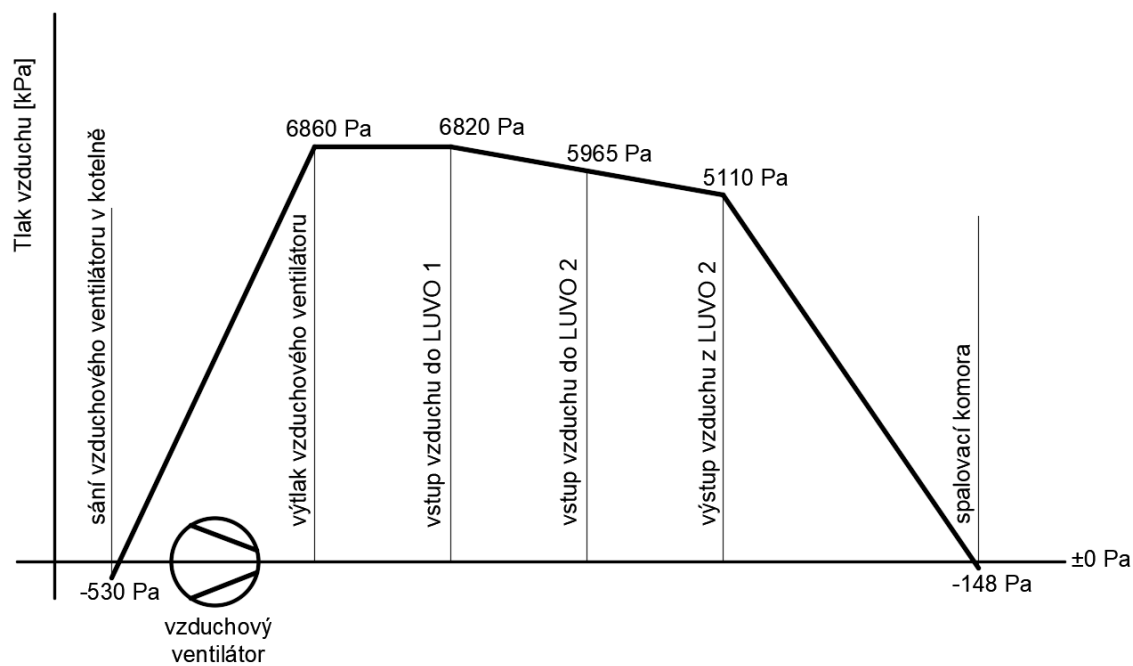




**Grafický průběh statického tlaku ve vzduchovém traktu kotle – Zkouška B**



**Grafický průběh statického tlaku ve vzduchovém traktu kotle – Zkouška C**

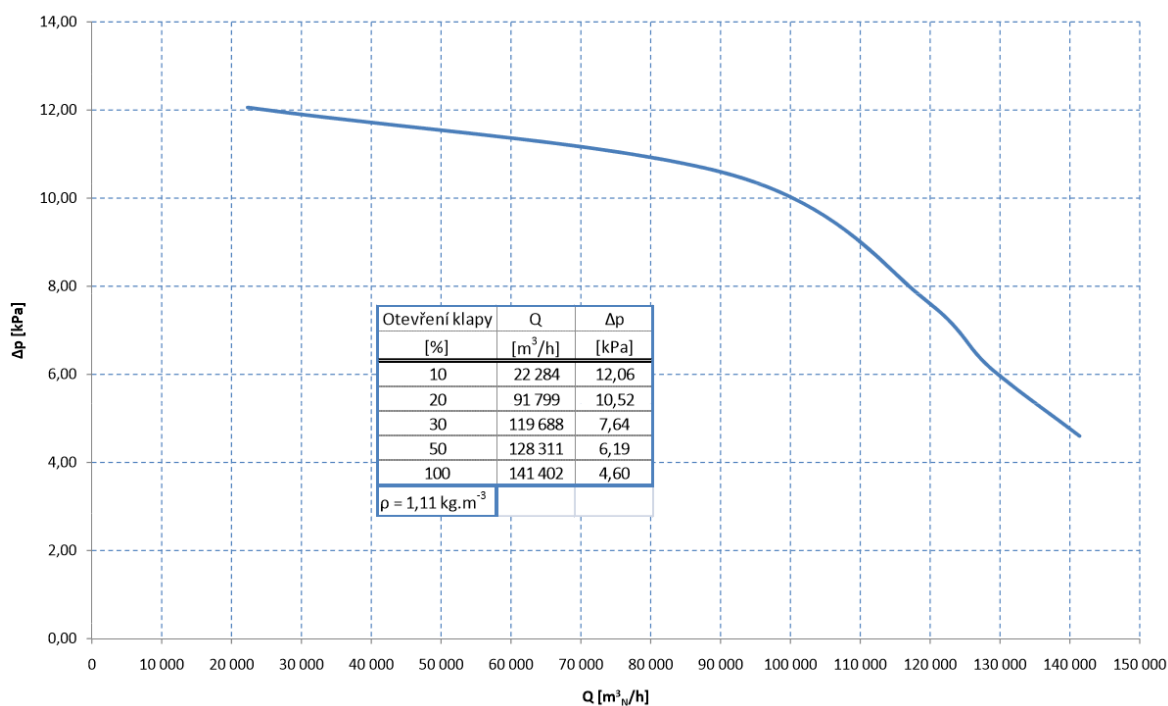


**Grafický průběh statického tlaku ve vzduchovém traktu kotle – Zkouška D**

### Příloha C

Otevření klapky ve výtlaku	[%]	10	20	30	50	100
Teplota okolí	[°C]	23	23	23	23	23
Atmosférický tlak	[Pa]	97450	97450	97450	97450	97450
Teplota vzduchu v měřicím místě	[°C]	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
Tlak vzduchu v měřicím místě	[Pa]	97060	97013	97055	97060	97013
Hustota vzduchu v normálním stavu	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Hustota vzduchu v efektivním stavu	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Střední rychlost vzduchu	[m.s <sup>-1</sup> ]	4,96	20,45	26,66	28,58	31,5
Množství vzduchu	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	6,19	25,5	33,25	35,64	39,28
	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	5,33	21,93	28,6	30,66	33,77
	[m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> ]	19171	78935	102960	110383	121586
	[kg. s <sup>-1</sup> ]	6,84	28,18	36,76	39,41	43,41

Naměřené a vypočtené hodnoty průtoku a parametrů vzduchu při měření charakteristiky vzduchového ventilátoru



Změřená charakteristika vzduchového ventilátoru

## Příloha D

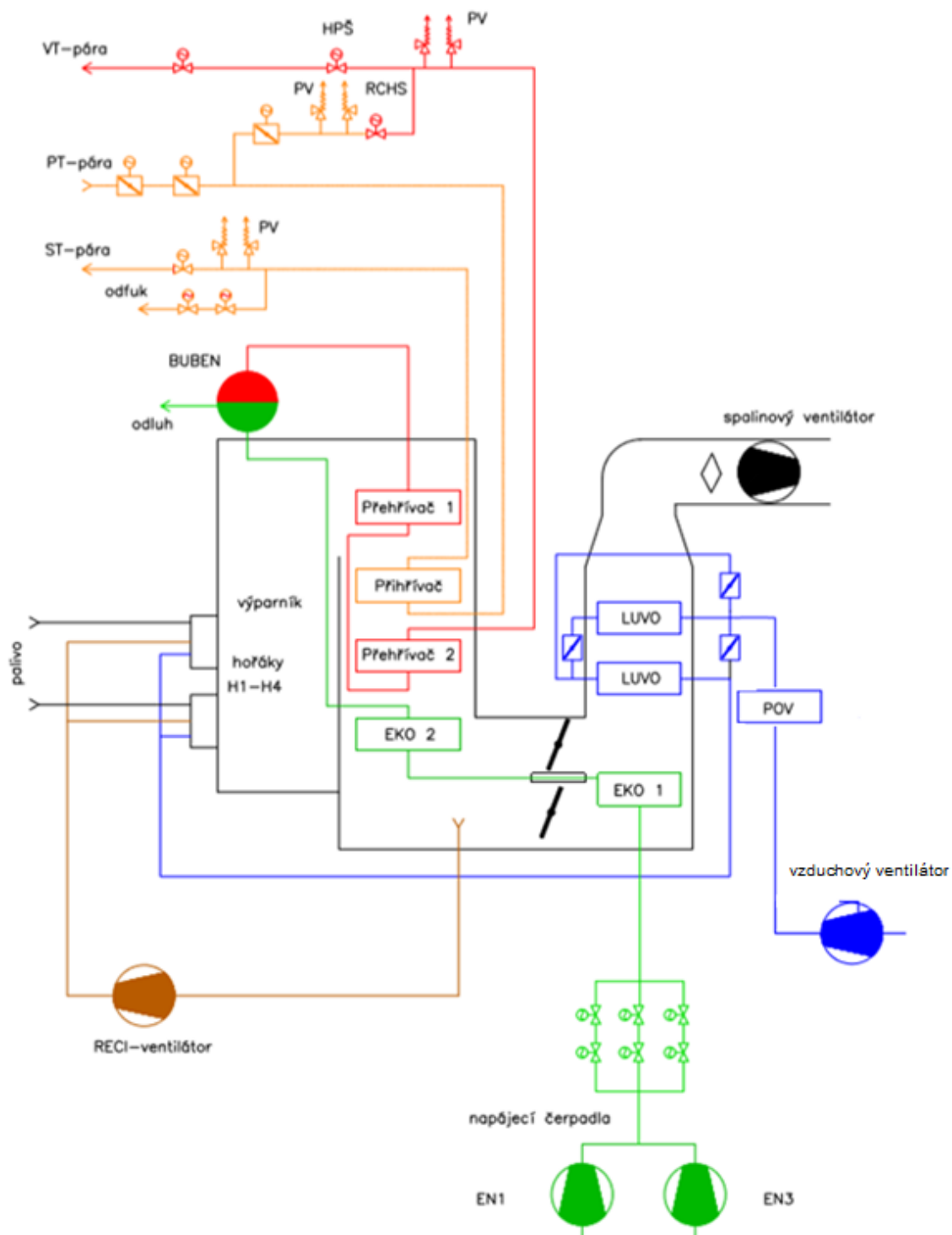


Schéma kotle s POV